

**ANÁLISIS DEL LOS INDICADORES DE SENSIBILIDAD DE TENSION Y
FLUJO DE POTENCIA REACTIVA RESPECTO A LAS VARIACIONES DE
CARGA REACTIVA**

JUAN FELIPE ORTIZ CASTRO
1088299429

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE TECNOLOGÍA
ESCUELA DE TECNOLOGÍA ELÉCTRICA
PEREIRA
2015

**ANÁLISIS DEL LOS INDICADORES DE SENSIBILIDAD DE TENSION Y
FLUJO DE POTENCIA REACTIVA RESPECTO A LAS VARIACIONES DE
CARGA REACTIVA**

JUAN FELIPE ORTIZ CASTRO.
1088299429

PARA OPTAR AL TITULO DE
TECNÓLOGO EN ELÉCTRICIDAD

DIRECTOR
PH.D. ANTONIO ESCOBAR ZULUAGA
DOCENTE PROGRAMA DE TECNOLOGIA ELÉCTRICA

UNIVERSIDAD TECNOLOGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE TECNOLOGIA
ESCUELA DE TECNOLOGIA ELECTRICA
PEREIRA
2015

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Pereira, Junio de 2015

AGRADECIMIENTOS

A mi madre por siempre estar ahí conmigo en las buenas y las malas apoyándome incondicionalmente.

A mi hermano, padre y todos mis familiares que estuvieron siempre pendientes de mí.

A mis compañeros de estudio que más que eso se convirtieron en mis amigos por acompañarme y ayudarme en este proceso.

A mi director Ph.D Antonio escobar Zuluaga por todos los conocimientos brindados durante toda la carrera y por el apoyo durante la elaboración de este proyecto.

DEDICATORIA

A mi madre por todo el amor y el apoyo durante toda mi vida.

A mi tía Luz Dary porque sé que donde este siempre está pendiente de mí y de mis logros.

CONTENIDO

Pág.

1.	CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA	15
1.1	1.1 SISTEMA ELECTRICO DE POTENCIA	15
1.2	1.2 POTENCIA ACTIVA	16
1.3	1.3 POTENCIA REACTIVA.....	17
1.4	1.4 FLUJO DE POTENCIA (ACTIVA Y REACTIVA).....	17
1.5	1.5 FORMULACION DEL PROBLEMA.....	18
1.6	1.6 PROBLEMA BASICO DE FLUJO DE POTENCIA	20
1.7	1.7 CARGABILIDAD	22
1.8	1.8 EFECTO DE LA POTENCIA REACTIVA EN LAS TENSIONES DE UN SEP	23
2.	INDICADORES DE SENSIBILIDAD.....	25
2.1	2.1 DEFINICION	25
2.2	2.2 SENSIBILIDAD EN UN SISTEMA DE POTENCIA DE 5 NODOS	26
3.	SIMULACION DEL SISTEMA ELECTRICO DE POTENCIA DE PEREIRA.....	31
3.1	3.1 PROCEDIMIENTO	31
3.2	3.2 CARACTERISTICAS DE LOS ELEMENTOS DEL SEP DE PEREIRA	31
3.3	3.3 SISTEMA DE PEREIRA	36
3.4	3.3 PUESTA A PUNTO CASO BASE	37
3.5	3.4 INYECCION DE REACTIVOS EN EL SEP DE PEREIRA	43
4.	PRUEBAS Y RESULTADOS	44
4.1	4.1 PROCEDIMIENTO	44
4.2	4.2 VARIACION PORCENTUAL DE CADA TENSION DE CADA NODO DEL SISTEMA CON RESPECTO A EL AUMENTO DE REACTIVOS EN LAS CARGAS	44
4.3	4.3 VARIACION PORCENTUAL DE TENSION EN LOS NODOS DEL SISTEMA PARA INYECCIONN DE REACTIVOS EN UN NODO DE CARGA	46
4.4	4.4 VARIACION PORCENTUAL DEL FLUJO DE POTENCIA REACTIVA EN LOS ELEMENTOS DEL SISTEMA OCASIONADO POR LA INYECCION DE REACTIVOS EN LOS NODOS DE CARGA	51

5.	CONCLUSIONES.....	55
6.	TRABAJOS FUTUROS.....	57
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	57
8.	ANEXOS.....	59

LISTA DE TABLAS

Pág.

<i>Tabla 1. Curva de potencia activa.....</i>	<i>16</i>
<i>Tabla 2. Datos nodos.....</i>	<i>19</i>
<i>Tabla 3. Datos generadores.....</i>	<i>31</i>
<i>Tabla 4. Datos línea.....</i>	<i>32</i>
<i>Tabla 5. Datos transformador.....</i>	<i>32</i>
<i>Tabla 6. Nomenclatura líneas.....</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 7. Nomenclatura transformadores.....</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 8. Nomenclaturas generadores.....</i>	<i>35</i>
<i>Tabla 9. Nomenclatura nodos.....</i>	<i>35</i>
<i>Tabla 10. Datos tensiones.....</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 11. Datos potencia reactiva.....</i>	<i>40</i>
<i>Tabla 12. Datos taps.....</i>	<i>41</i>

LISTA DE FIGURAS

Pág.

<i>Figura 2. Sistema externo.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 3. Curva de cargabilidad de una línea</i>	<i>22</i>
<i>Figura 4. Sistema de 5 nodos</i>	<i>26</i>
<i>Figura 5. Sistema de 5 nodos con aumento de reactivos caso1.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 6. Sistema de 5 nodos con aumento de reactivos caso 2.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 7. Sistema de 5 nodos con aumento de reactivos caso 3.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 8. Sistema de 5 nodos con aumento de reactivos caso 4.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 9. Topología del sistema eléctrico de potencia de Pereira caso original</i>	<i>36</i>
<i>Figura 10. Topología del sistema eléctrico de potencia de Pereira caso base .</i>	<i>38</i>
<i>Figura 11. Topología del sistema eléctrico de potencia de Pereira cargas unificadas.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 12. Topología del sistema eléctrico de potencia de Pereira caso aumento de reactivos nodo cuba</i>	<i>43</i>
<i>Figura 13. Inyección de reactivos en el nodo: DQ2</i>	<i>44</i>
<i>Figura 14. Inyección de reactivos en el nodo: VENTO</i>	<i>45</i>
<i>Figura 15. Inyección de reactivos en el nodo: VENTO2</i>	<i>45</i>
<i>Figura 16. Inyección de reactivos en el nodo: NA2.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 17. Efecto de inyección de reactivos en el nodo: DQ</i>	<i>47</i>
<i>Figura 18. Efecto de inyección de reactivos en el nodo: DQ2</i>	<i>47</i>
<i>Figura 19. Efecto de inyección de reactivos en el nodo: DQ3</i>	<i>48</i>
<i>Figura 20. Efecto de inyección de reactivos en el nodo: CEN2</i>	<i>48</i>
<i>Figura 21. Efecto de inyección de reactivos en el nodo: BE.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 22. Efecto de inyección de reactivos en el nodo: LIBARE.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 23. Efecto de inyección de reactivos en el nodo: PA</i>	<i>50</i>
<i>Figura 24. Efecto de inyección de reactivos en el nodo: PA1</i>	<i>50</i>
<i>Figura 25. Efecto de inyección de reactivos en el nodo: ROSA2.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 26. Variación del flujo de reactivos ocasionado por el nodo: VENTO</i>	<i>52</i>
<i>Figura 27. Variación del flujo de reactivos ocasionado por el nodo: NA2</i>	<i>52</i>
<i>Figura 28. Variación del flujo de reactivos ocasionado por el nodo: DQ2</i>	<i>53</i>
<i>Figura 29. Variación del flujo de reactivos ocasionado por el nodo: CUBA3</i>	<i>53</i>
<i>Figura 30. Variación del flujo de reactivos ocasionado por el nodo: PA1</i>	<i>54</i>
<i>Figura 31. Variación del flujo de reactivos ocasionado por el nodo: DQ3.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 32. Inyección de reactivos en el nodo: pa1</i>	<i>59</i>
<i>Figura 33. Inyección de reactivos en el nodo: DQ3</i>	<i>59</i>

<i>Figura 34. Inyección de reactivos en el nodo: CEN2</i>	<i>60</i>
<i>Figura 35. Inyección de reactivos en el nodo: ROSA.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 36. Inyección de reactivos en el nodo: CUBA3.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 37. Efecto de inyección de reactivos en el nodo: VENTO.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 38. Efecto de inyección de reactivos en el nodo: ROSA.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 39. Efecto de inyección de reactivos en el nodo: NARA.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 40. Efecto de inyección de reactivos en el nodo: NA2</i>	<i>63</i>
<i>Figura 41. Efecto de inyección de reactivos en el nodo: CUBA3.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 42. Efecto de inyección de reactivos en el nodo: CUBA2</i>	<i>64</i>
<i>Figura 43. Efecto de inyección de reactivos en el nodo: CUBA.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 44. Efecto de inyección de reactivos en el nodo: CEN</i>	<i>65</i>
<i>Figura 45. Efecto de inyección de reactivos en el nodo: BE2</i>	<i>66</i>
<i>Figura 46. Efecto de inyección de reactivos en el nodo: VENTO2.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 47. Variación del flujo de reactivos ocasionado por el nodo: ROSA</i>	<i>67</i>
<i>Figura 48. Variación del flujo de reactivos ocasionado por el nodo: CEN2.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 49. Variación del flujo de reactivos ocasionado por el nodo: VENTO2 ..</i>	<i>67</i>

INTRODUCCIÓN

El análisis de los sistemas eléctricos de potencia busca la detección y corrección de errores provenientes de fallos (contingencias simples o múltiples) o eventos programados (mantenimiento del sistema) garantizando la operación normal frente a estos casos. Dichos análisis comprenden el estudio de una gran cantidad de variables como corrientes, tensiones, potencia activa y reactiva entre otras, que de no estar en los límites establecidos pueden llegar a causar fallos en el sistema y en el caso más crítico causar un *blackout*.

La potencia reactiva afecta directamente la tensión pero también puede afectar otras variables como corrientes y la cargabilidad del sistema para el control de dichos reactivos se implementa como primera medida el direccionamiento del flujo de potencia reactiva por medio de los taps de los transformadores, los cuales actúan como agentes de tráfico al paso de los reactivos. Ya agotada esta herramienta el siguiente método es la inyección (positiva o negativa) de reactivos por medio de bancos de condensadores ubicados estratégicamente según la zona que se desea regular. Conocer estos datos es de mucha importancia a la hora de la planeación de la transmisión de la energía, siendo la potencia reactiva y sus efectos uno de las muchas variables que contemplan los análisis de sistemas eléctricos de potencia y el conocimiento de todas estas variables. Ya con estos datos y una correcta planeación hace mas confiable y optimo el funcionamiento de un sistema eléctrico de potencia.

Un sistema eléctrico de potencia confiable es aquel que tiene la capacidad de transportar energía eléctrica desde los centros de generación hasta los grandes centros de consumo de manera segura y garantizando una alta calidad en los niveles establecidos por los entes reguladores. Para que esto pase es necesario mantener el sistema en constante estudio o monitoreo, con el fin de prevenir posibles fallos (contingencias), mantenimiento de los elementos que componen el sistema eléctrico, también un control de la generación y la demanda con el fin de que el sistema este apto para expansiones futuras en caso de crecimiento de la demanda.

La confiabilidad en el sistema compuesto generación-transmisión ha sido y sigue siendo un área de intensa investigación a nivel internacional debido a:

1. Lo sensible que es la sociedad ante las interrupciones en el servicio de suministro de energía eléctrica debido a la alta dependencia que se tiene de este insumo para todas las actividades de la vida diaria.
2. Las fallas aleatorias en los componentes de generación y transmisión no pueden evitarse y pueden afectar la continuidad en el servicio de usuarios ubicados en grandes zonas geográficas.
3. La desregularización del sector eléctrico, ocurrida en los años 90, introdujo nuevos esquemas operativos que implican un uso intenso de los equipos de

instalaciones eléctricas y la compensación a los usuarios si no se cumple un nivel estipulado de número de fallas y su duración [1].

Un fallo o contingencia se produce cuando una o más variables (tensión, corriente, cargabilidad, flujos de potencia activa y reactiva) en un SEP (sistema eléctrico de potencia) se encuentran por fuera de los rangos establecidos esto puede ser causado por la salida controlada o accidental de elementos como líneas, transformadores y generadores la severidad de dicho fallo depende de la importancia e influencia tenga el elemento saliente sobre el resto del sistema, la salida de un elemento de mayor importancia provoca grandes alteraciones en los niveles de tensión en el flujo de potencia y en la cargabilidad de los elementos del sistema esto puede ocasionar la salida en cascada de más elementos lo cual puede conllevar a que la operación del sistema colapse en su totalidad, mientras que la salida de un elemento de menor importancia puede ser sustituido por elementos cercanos sin que los otros elementos tengan una gran afectación y por esto la operación no sufre mayores cambios

En este trabajo se analizaron flujo de potencia reactiva y tensión dos de las variables presentes en un SEP ambas son dinámicas y susceptibles a las fallas que ocurran en el sistema por ejemplo:

- La salida de una línea de transmisión ocasiona que tanto el flujo de potencia activo como reactivo que se transporta por las líneas busquen nuevas rutas tratando de suplir la vía de transporte que representaba la línea ausente esto puede conllevar a que las líneas restantes que quedan en el sistema transporten más flujo de potencia que el que están diseñadas para transportar produciendo sobrecargas y de acuerdo con la magnitud de la sobrecarga la salida de más líneas o elementos
- Una sobre tensión en los nodos de un SEP ocasiona daño directo a los elementos que están conectados a él transformadores líneas cargas y esto también puede ocasionar un efecto en cascada dependiendo de la magnitud del delta de tensión

Cuando de potencia reactiva se encuentran muy debajo del límite establecido no es una condición buena para el sistema ya que esto quiere decir que el sistema está sobredimensionado y económicamente esto no es viable la tensión en los nodos está reglamentada por la CREG (comisión de regulación y gas) para Colombia para que se encuentre en un rango del 95% al 105% por debajo de 95% hay pérdidas de tensión y no se puede garantizar que llegue al consumidor con la calidad requerida por encima de 105% se presenta el problema de sobretensión que además de no dar al usuario el límite de tensión requerido también provoca daños a los elementos del sistema.

Lo primordial después de sucedido un fallo o contingencia es volver lo más pronto posible a la operación normal procurando afectar lo mínimo posible el resto del sistema es por eso que todos los análisis de contingencias y estudios del comportamiento de las variables de un SEP son de gran ayuda a la hora de

aplicar estrategias efectivas para prevenir o en el peor de los casos solucionar una contingencia.

En este trabajo se aborda como objeto de estudio la variante de potencia reactiva, y se analizó como un incremento en dicha variable afecta la tensión de los nodos y el flujo de potencia reactiva en el sistema eléctrico de potencia en Pereira por medio del paquete computacional de NEPLAN 5.2. Para que el análisis se hiciera en un momento en que el sistema se encontrara exigido por la demanda se tomaron como base los datos de la carga de Pereira a la hora 21.00 PM la cual es considerada una hora pico o de mayor demanda y índices de sensibilidad que facilitaron la comprensión de los resultados arrojados por NEPLAN 5,2

OBJETIVO GENERAL

Calcular los indicadores de sensibilidad de potencia reactiva y tensión ante la inyección de potencia reactiva en los nodos de carga del sistema eléctrico de Pereira

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Modelar el sistema eléctrico de Pereira en el software NEPLAN 5.2, tomando como base los datos de la hora 21.
- Mantener constante la potencia activa y aumentar marginalmente la potencia reactiva nodal y observar su efecto en las tensiones nodales y en los flujos de potencia reactiva.
- Calcular los índices de sensibilidad asociados a la variación de los flujos de potencia reactiva y las tensiones respecto a las variaciones de potencia reactiva en los nodos de carga.
- Clasificar los nodos y elementos del sistema según su índice de sensibilidad es decir ordenarlos de mayor a menor cambio respecto a su valor base de tensión o potencia reactiva.
- Encontrar relaciones entre los índices de sensibilidad de los elementos del sistema y los nodos de carga, es decir identificar que líneas o transformadores son afectados por variaciones en un nodo de carga específico.

CAPÍTULO 1

1. CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

1.1 SISTEMA ELECTRICO DE POTENCIA

El término Sistema de Potencia se utiliza para referirnos al conjunto de elementos físicos necesarios para realizar la interconexión entre los generadores de gran potencia y los grandes centros de consumo de energía eléctrica, a través de un sistema de transmisión de alta tensión y gran potencia.

Los sistemas de potencia cubren grandes extensiones geográficas y se caracterizan, eléctricamente, por interconectar los elementos que los constituyen a través de circuitos trifásicos de gran capacidad, en ocasiones con presencia de un conductor de neutro. Los elementos físicos más importantes que conforman el sistema de potencia son los elementos mecánicos, eléctricos y electrónicos que, operando conjuntamente y bajo la coordinación de personal especializado y sistemas automáticos de control, permiten las siguientes tareas:

- Realizar procesos de transformación de energías primarias en energía eléctrica.
- Transportar la energía eléctrica.
- Distribuir la energía eléctrica.
- Interconectar las diferentes áreas de producción y consumo.
- Determinar costos y tarifas de la energía eléctrica y permitir la existencia de mercados de electricidad en sistemas no regulados.
- Controlar, supervisar y gobernar en forma particular cada uno de los elementos del sistema de generación, transmisión, subtransmisión y distribución, y controlar la operación global del sistema para obtener en cada momento las mejores condiciones, tanto en estado estable como durante periodos transitorios [2].

En el sistema de potencia la materia prima es la energía en sus diferentes manifestaciones: potencial gravitacional, cinética, térmica, química, nuclear, entre otras, y el producto es la energía eléctrica en forma de campos eléctricos y magnéticos que son los encargados de transportar la energía convertida en eléctrica hasta los diferentes dispositivos consumidores que la utilizan. Los usuarios de la

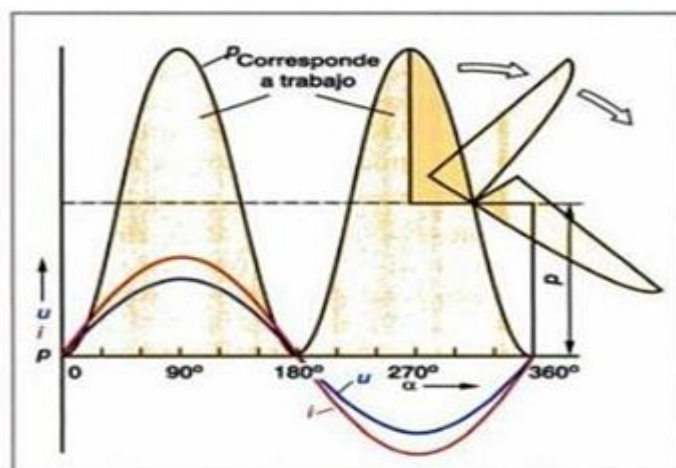
energía eléctrica la requieren para convertirla de nuevo en otras formas de energía como por ejemplo, en energía térmica (en las estufas, hornos y calefactores eléctricos), cinética (en motores rotativos y lineales), luz, sonido, etc. Para el operador del sistema y para quien utiliza dispositivos eléctricos con cualquier propósito, la presencia de los campos eléctrico y magnético pasa generalmente desapercibida y más bien se asocia la energía eléctrica a la tensión AC o DC y a las corrientes que estas tensiones originan al ser aplicadas sobre elementos conductores o semiconductores.

Para que los generadores y consumidores puedan ejercer sus actividades de venta y compra de electricidad existen agentes que reglamentan y que controlan el adecuado funcionamiento del sistema eléctrico como: el operador del sistema, el agente responsable del mercado de energía eléctrica, el agente responsable por reglamentar las actividades del sector y el agente regulador del sistema [3].

1.2 POTENCIA ACTIVA

Es la potencia que en el proceso de transformación de la energía eléctrica se aprovecha como trabajo, los diferentes dispositivos eléctricos existentes convierten la energía eléctrica en otras formas de energía tales como: mecánica, lumínica, térmica, química, etc. Esta dado por un número real. La intensidad y la tensión en una resistencia por ejemplo un calefactor, conectada en un circuito de corriente alterna tiene la misma fase. La curva de potencia activa es siempre positiva.

Tabla 1. Curva de potencia activa.



Fuente: <http://potenciaelectrica.wikispaces.com/4+Potencia+Activa+-+Reactiva+-+Aparente>

La unidad de potencia activa es el WATT los múltiplos más utilizados del watt son: el kilowatt (kW) y el Megawatt (MW) y los submúltiplos, el miliwatt (mW) y el microwatt (W). La fórmula matemática para hallar la potencia activa que consume un equipo eléctrico cualquiera cuando se encuentra conectado a un circuito monofásico de corriente alterna es la siguiente:

$$P = V \cdot I \cdot \cos \varphi$$

De donde: · P = Potencia de consumo eléctrico, expresada en watt (W) · I = Intensidad de la corriente que fluye por el circuito, en ampere (A) · Cos = Valor del factor de potencia o coseno de “fi” (En los dispositivos que poseen solamente carga resistiva, el factor de potencia es siempre igual a “1”, mientras que en los que poseen carga inductiva ese valor será siempre menor de “1”).

1.3 POTENCIA REACTIVA

Potencia disipada por las cargas reactivas (Bobinas o inductores y capacitores o condensadores). Se pone de manifiesto cuando existe un trasiego de energía entre los receptores y la fuente, provoca pérdidas en los conductores, caídas de tensión en los mismos, y un consumo de energía suplementario que no es aprovechable directamente por los receptores. Como está conformada por bobinas y capacitores es importante saber que las bobinas se toman positivas y los condensadores negativos. Estos se pueden sumar algebraicamente. Generalmente está asociada a los campos magnéticos internos de los motores y transformadores. Se mide en MVAR. Como esta energía provoca sobrecarga en las líneas transformadoras y generadoras, sin producir un trabajo útil, es necesario neutralizarla o compensarla. La potencia reactiva está en el eje imaginario Y y la activa en el eje real X, por lo cual te forma un triángulo rectángulo cuya magnitud de la hipotenusa es denominado potencia "aparente". La potencia reactiva o inductiva no proporciona ningún tipo de trabajo útil, pero los dispositivos que poseen enrollados de alambre de cobre, requieren ese tipo de potencia para poder producir el campo magnético con el cual funcionan. La unidad de medida de la potencia reactiva es el volt-ampere reactivo (VAR). Esta dada por números imaginarios. La fórmula matemática para hallar la potencia reactiva de un circuito eléctrico es la siguiente:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}$$

De donde: · Q = Valor de la carga reactiva o inductiva, en volt-ampere reactivo (VAR) · S = Valor de la potencia aparente o total, expresada en volt-ampere (VA) · P = Valor de la potencia activa o resistiva, expresada en watt (W) Potencia Aparente: “una parte de la curva de potencia es negativa. En este punto se cede potencia al generador [4].

1.4 FLUJO DE POTENCIA (ACTIVA Y REACTIVA)

En ingeniería eléctrica, el estudio de flujo de potencia, también conocido como flujo de carga, es una herramienta importante que involucra análisis numérico aplicado a

un sistema de potencia. En el estudio del flujo de potencia usualmente se usa una notación simplificada tal como el diagrama unifilar y el sistema por unidad, y se centra en varias formas de la potencia eléctrica AC (por ejemplo, voltajes, ángulos de los voltajes, potencia activa y potencia reactiva). Este estudio analiza los sistemas de potencia operando en estado estable. Existen varios software que implementan el estudio del flujo de potencia.

En adición al análisis de flujo de potencia, llamado en ocasiones el caso base, muchas implementaciones software ejecutan otros tipos de análisis, tal como el análisis de falla de cortocircuito, estudios de estabilidad (transitorio y estado estable), *unit commitment (programación de arranques y paradas de unidades térmicas)* y despacho económico. Particularmente, algunos programas usan programación lineal para encontrar el flujo de carga óptimo, es decir, las condiciones que dan el costo más bajo por kilovatio-hora entregado [5].

El estudio del flujo de carga, también llamado flujo de potencia, distribución de carga, etc., consiste en la determinación de voltajes, intensidades, potencias activas y reactivas en distintos puntos de una red eléctrica. Se consideran sistemas en régimen, equilibrados, sinusoidales, sin anomalías y se trabaja entre fase y neutro. Los resultados que se obtienen son, generalmente, el módulo y la fase de la tensión en cada barra, así como las potencias activa y reactiva entrantes en cada una de ellas, Estos resultados pueden ser utilizados para:

- Evaluar el comportamiento del sistema existente en condiciones estacionarias normales o anormales.
- Estudiar alternativas para la planificación de nuevos sistemas o ampliación de los ya existentes.
- Estudiar la estabilidad transitoria y permanente de sistemas de potencia
- Elaborar plan de contingencias ante fallo de un elemento de la red.

A diferencia de los problemas considerados en la Teoría General de Circuitos, cuya solución consistía, utilizando el método de nudos y mallas, en la resolución de un sistema de ecuaciones algebraicas lineales, en una red de potencia, las ecuaciones que ligán las incógnitas son no lineales, por lo cual deberemos valernos de los métodos matemáticos más recientes del cálculo numérico. Estos métodos, en general iterativos, permiten una rápida resolución al problema.

1.5 FORMULACION DEL PROBLEMA

Condiciones iniciales y tipos de nodos:

Se tienen cuatro variables reales asociadas a cada una de los nodos:

- P Potencia Activa

- Q Potencia Reactiva
- V Módulo de la tensión respecto al neutro N del sistema
- θ Ángulo de fase de la tensión

En cada una de los nodos, dos de estas magnitudes se supondrán inicialmente conocidas y las dos restantes serán incógnitas del problema. Las distintas combinaciones de incógnitas y datos nos permiten definir los siguientes 4 tipos de nodos [6].

Tipo de nodos:

Nodo slack o compensador: es solo un nodo del sistema y se caracteriza por que tiene una reserva de potencia activa suficiente para atender desvíos en la programación de la generación. También tiene la capacidad para inyectar potencia reactiva al sistema y controlar la tensión de su barra.

Nodo PV o nodo de generación: son aquellos nodos que tienen la capacidad de suministrar una potencia importante al sistema. En este nodo se define la potencia que el nodo le inyecta al sistema y la tensión que el nodo define para su barra.

Nodo PQ o de carga: son aquellos nodos del sistema de potencia que únicamente consumen potencia que pueden llegar a tener generación pero poco representativa para el sistema por esto es considerado como un nodo de carga.

Tabla 2. Datos nodos.

NODO	DATOS	INCOGNITAS
slack	$V_i, \Phi_i,$	P_i, Q_i
PV	P_i, V_i	Φ_i, Q_i
PQ	P_i, Q_i	Φ_i, V_i

Sistema interno: es la parte de la red del sistema de potencia que permanece invariable, el sistema interno se representa circuitalmente a través de admitancias independientemente del elemento referente.

Sistema externo: es la parte de la red de un sistema de potencia que puede cambiar durante la operación del sistema, circuitalmente se representa a través de potencias inyectadas.

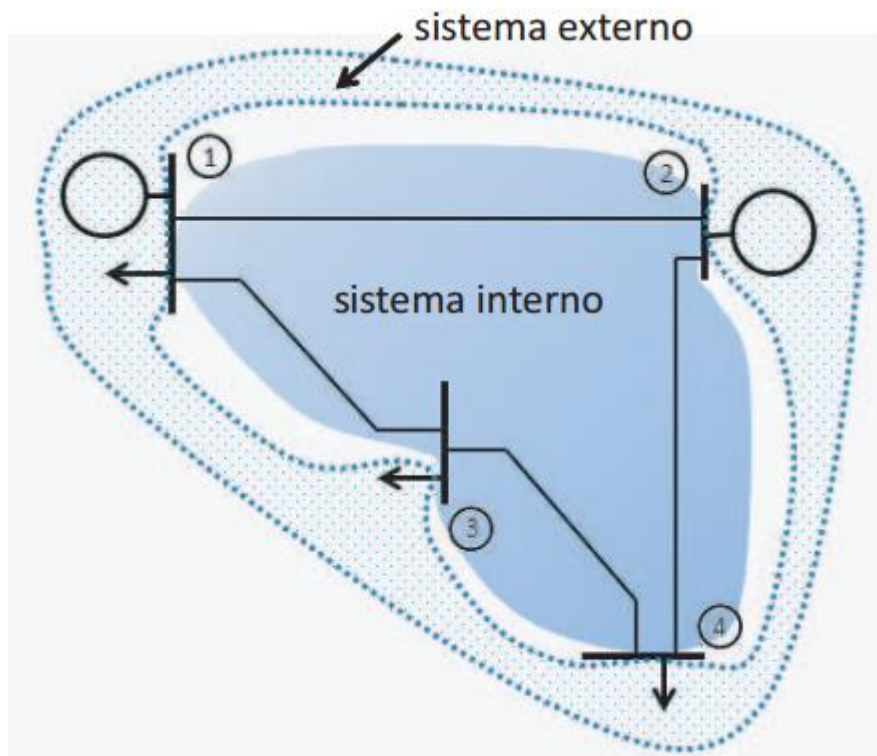
Matriz YBUS: es una matriz cuadrada de $n \times n$, siendo n el número de nodos del sistema; para construir la matriz YBUS es necesario separar el sistema de potencia en su sistema interno y su sistema externo y representar todos los elementos del sistema interno a través de admitancias.

Los componentes de un sistema de potencia se encuentran interconectados eléctricamente, lo que hace que un cambio de un parámetro de un elemento o de la potencia generada o demandada en un nodo, produzca una variación de las

corrientes, potencias o tensiones existentes en otras partes del sistema. Un efecto que inicialmente es localizado puede generar efectos globales, y su intensidad depende, entre otras cosas, de la distancia eléctrica existente entre los elementos. La relación de interdependencia entre los diferentes elementos del sistema de potencia puede ser adecuadamente caracterizada por la matriz admitancia: YBUS o la matriz impedancia ZBUS.

El sistema interno lo conforman las líneas, transformadores y demás elementos pasivos que permanecen inalterados durante la operación del sistema. Los nodos permiten la interconexión entre el sistema interno y el sistema externo.

Figura 1. Sistema externo



Fuente: <http://www.utp.edu.co/~aescobar/matrizYbus.pdf>

Cuando se formula matemáticamente el sistema solo se escribe las ecuaciones que relacionan las corrientes inyectadas del sistema, las tensiones nodales y los parámetros de los elementos del sistema interno escritos en forma de admitancias. Las corrientes que fluyen por el interior del sistema no se plantean explícitamente. Las relaciones existentes entre las tensiones nodales, las corrientes netas inyectadas en cada nodo y las admitancias de los elementos del sistema, se determinan aplicando a la red la primera y la segunda ley de Kirchhoff [7].

1.6 PROBLEMA BÁSICO DE FLUJO DE POTENCIA

Dado un problema de flujo de potencia con su sistema bien definido el sistema externo debe definirse utilizando cuatro variables por cada uno de los nodos que interconectan el sistema interno al sistema externo. Esas cuatro variables son la

potencia tanto activa como reactiva inyectada al nodo, la tensión del nodo y el ángulo de la tensión de cada nodo.

Mientras el sistema externo es adecuadamente representado por las potencias inyectadas de cada nodo (P_i , Q_i) las tensiones y sus ángulos (V_i , Φ_i) no hacen parte del sistema externo pero operan como incógnitas del problema, dichas tensiones con sus respectivos ángulos sirven para enlazar el sistema externo e interno y tienen un significado especial ya que a través de su valor se puede determinar el estado de sistema en conjunto es por esto que se denominan variables de estado

Sistema de ecuaciones: las ecuaciones básicas que permiten resolver un sistema de potencia resultan de aplicar la primera y segunda ley de Kirchhoff en los nodos del sistema

$$P_i = \sum_{j=1}^n V_i V_j Y_{ij} \cos(\Phi_i - \Phi_j - \theta_{ij})$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^n V_i V_j Y_{ij} \sin(\Phi_i - \Phi_j - \theta_{ij})$$

Debido a que únicamente se puede plantear dos ecuaciones y el número de incógnitas son cuatro se puede decir que el sistema tiene infinitas soluciones y para poder resolverlo es necesario asignar valores arbitrarios a $2n$ incógnitas por nodo

Las ecuaciones que salen de los nodos resultan de aplicar en ellos las leyes de Kirchhoff estas ecuaciones no son lineales y su solución es compleja, para solucionarlas se aplican varios algoritmos algebraicos el software de NEPLAN en el cual fueron realizadas las simulaciones de este proyecto utiliza para la solución de flujos de potencia el algoritmo de Newton Raphson:

Algoritmo de Newton-Raphson: En análisis numérico, el método de Newton (conocido también como el método de Newton-Raphson o el método de Newton-Fourier) es un algoritmo eficiente para encontrar aproximaciones de los ceros o raíces de una función real. También puede ser usado para encontrar el máximo o mínimo de una función, encontrando los ceros de su primera derivada [8].

Para aplicar este método en un SEP se deben seguir los siguientes pasos:

1. **Paso inicial:** definir los tipos de nodos (*slack*, PV, PQ) y a partir de esta definición plantear el sistema de ecuaciones necesarias para resolver el subproblema 1
 - Asumir unos valores iniciales para todos los ángulos y tensiones incógnitas
 - Para cada nodo PV definir un $\Phi_i=0$
 - Para cada nodo PQ definir $\Phi_i=0$, $V_i=0$
 - Incógnitas= una por cada nodo PV y dos por cada nodo PQ
 - se sugiere iniciar con las tensiones incógnitas en 1.0 pu
 - se sugiere iniciar con los ángulos incógnitas en 0°

2. Calcular las P_i, Q_i en los nodos PQ y las PI en los nodos PV usando las ecuaciones y los valores de la iteración anterior (t-1)

$$P_i \rightarrow P_i^{calc(t)}$$

$$Q_i \rightarrow q_i^{calc(t)}$$

3. calcular los errores potencia

$$\Delta P_i^t = P_i^{SCH} - P_i^{calc(t)}$$

$$\Delta Q_i^t = Q_i^{SCH} - Q_i^{calc(t)}$$

Si el error de potencia $\left\| \frac{\Delta P_i}{\Delta Q_i} \right\| \leq 0.01$ cumple

Si el error de potencia $\left\| \frac{\Delta P_i}{\Delta Q_i} \right\| \not\leq 0.01$ no cumple y se debe ir al paso 4

4. calcular las potencias P_i, Q_i de los nodos PQ y las potencias P_i de los nodos PV para la próxima iteración y calcular los ángulos y las tensiones de la próxima iteración usando el sistema de ecuaciones (1) ir al paso 3

1.7 CARGABILIDAD

Es el límite térmico dado en capacidad de corriente para líneas de transporte de energía y transformadores entre otros elementos que componen un SEP.

La cargabilidad de una línea de transmisión indica la capacidad de potencia que puede fluir por la línea bajo condiciones de operación aceptables. La cargabilidad de la línea está en función del calibre y la longitud de la línea, para conocer su comportamiento se consideran condiciones óptimas de voltaje en ambos extremos de la misma, es decir, un voltaje de 1 p.u. tanto en el nodo de envío como en el de recepción, como se muestra en la siguiente figura.

Figura 2. Curva de cargabilidad de una línea



Fuente: http://www.ingenieria.unam.mx/~revistafi/ejemplares/V15N2/V15N2_art10.pdf

La cargabilidad de una línea puede valorarse a partir de la relación del flujo de potencia real contra potencia reactiva (P-Q) a través de la línea eléctrica. Esta curva característica (P-Q) varía tanto por el flujo de potencia como por la longitud de la línea. La curva característica potencia real-potencia reactiva de una línea eléctrica indica que al incrementar su flujo de potencia real, aumenta la potencia reactiva que

esta consume, lo que se manifiesta como pérdida de potencia en la reactancia inductiva en serie de la línea [9].

En un transformador la duración de la vida de un transformador se encuentra muy vinculada con la cargabilidad de ese transformador, partiendo de que la vida útil de un transformador se puede asimilar a la vida de su aislamiento sólido. Un transformador que funciona a regímenes de carga muy elevados verá reducida la vida de su aislamiento a un ritmo mucho más alto que un transformador que trabaja en regímenes de carga inferiores, por lo tanto resultará fundamental analizar qué aspectos influyen sobre la cargabilidad de un transformador y como se pueden buscar las condiciones que permitan optimizar la utilización de éste a partir de esos parámetros que intervienen en su cargabilidad.

Los parámetros más importantes y que más influencia tienen en la cargabilidad de un transformador son los siguientes:

- Nivel de potencia y tamaño del transformador.
- Tipo de aislamiento celulósico del transformador.
- Tipo de refrigeración.
- Condiciones ambientales.
- Otros aspectos relacionados con el estado del transformador [10].

1.8 EFECTO DE LA POTENCIA REACTIVA EN LAS TENSIONES DE UN SEP

Un sistema eléctrico eficiente debe mantener todas sus variables dentro de los límites de regulación establecidos, una de estas variables es la tensión la cual para Colombia debe mantener en un rango del 95% al 105% en todos los nodos que integran un sistema. Una variación en flujo de potencia reactiva afecta directamente las tensiones nodales del sistema la relación entre potencia reactiva y tensión hace de suma importancia los análisis de la variable reactiva ya que por medio de esta se puede mantener reguladas las tensiones del sistema

La compensación de potencia reactiva es un fenómeno indispensable para la mejora de la eficiencia energética de los sistemas eléctricos. Esta se realiza usualmente en dos subsistemas bien definidos: el subsistema de distribución primaria, perteneciente al proveedor eléctrico, a través del cual se hace llegar la energía disponible a los clientes, y el subsistema de suministro eléctrico o también denominado de distribución secundaria (de baja tensión por lo general), propiedad en muchos casos del cliente, siendo el eslabón final donde se satisfacen las necesidades energéticas de los receptores.

Son varias las ventajas que proporciona la compensación de potencia reactiva para el sistema eléctrico, pero en el caso del subsistema de distribución primaria se ve más asociado a la necesidad de reducir pérdidas de energía durante el transporte y mejorar el perfil de la tensión. Por su parte, en los sistemas de suministro eléctrico dicha compensación está relacionada con la mejora del factor de potencia, establecido en la ley de comercialización del servicio eléctrico del país, al ser caracterizados dichos sistemas por operar como entidades económicas

independientes, que se relacionan contractualmente con las empresas de transmisión y distribución de energía eléctrica.

En los sistemas de suministro eléctrico la compensación de potencia reactiva se realiza usualmente mediante bancos de capacitores trifásicos balanceados fijos o variables (controlados).

Los métodos de selección de tales dispositivos han sido basados en técnicas de optimización, clasificadas en: analíticas, de programación matemática, heurísticas y de inteligencia artificial, encontrándose dentro de estas últimas los algoritmos genéticos [11].

CAPÍTULO 2

2. INDICADORES DE SENSIBILIDAD

2.1 DEFINICION

Los indicadores de sensibilidad son expresiones numéricas que nos permiten medir y cuantificar la variación de parámetros en diferentes procesos (económicos, eléctricos, mecánicos, industriales, entre otros); los indicadores son de mucha utilidad a la hora de recoger datos con el fin de diseñar, planear y corregir procesos, algunas de sus ventajas son:

- Sirven de guía en análisis de comportamiento de los procesos
- Representan de una manera específica y concreta alguna situación abstracta o difícil de pensar.
- Se expresa con cifras, aunque la medición se hiciera por distintos observadores, el resultado siempre será el mismo
- Pueden ser expresados en forma sencilla como por ejemplo por medio de gráficas o tablas
- Ayudan a distinguir entre la variación normal y la variación excesiva de un procesos o parámetro.
- Ayudan a facilitar la toma oportuna de decisiones.

Los indicadores de sensibilidad en un SEP nos permiten medir entre otras opciones el grado de afectación que sufre un sistema al ser expuesto a un cambio de sus parámetros normales de operación, la variación que sufren dichos parámetros con respecto a su valores bases nos da a conocer que tan sensible es el sistema a una alteración de sus variables (corriente, tensión, potencia activa o reactiva).

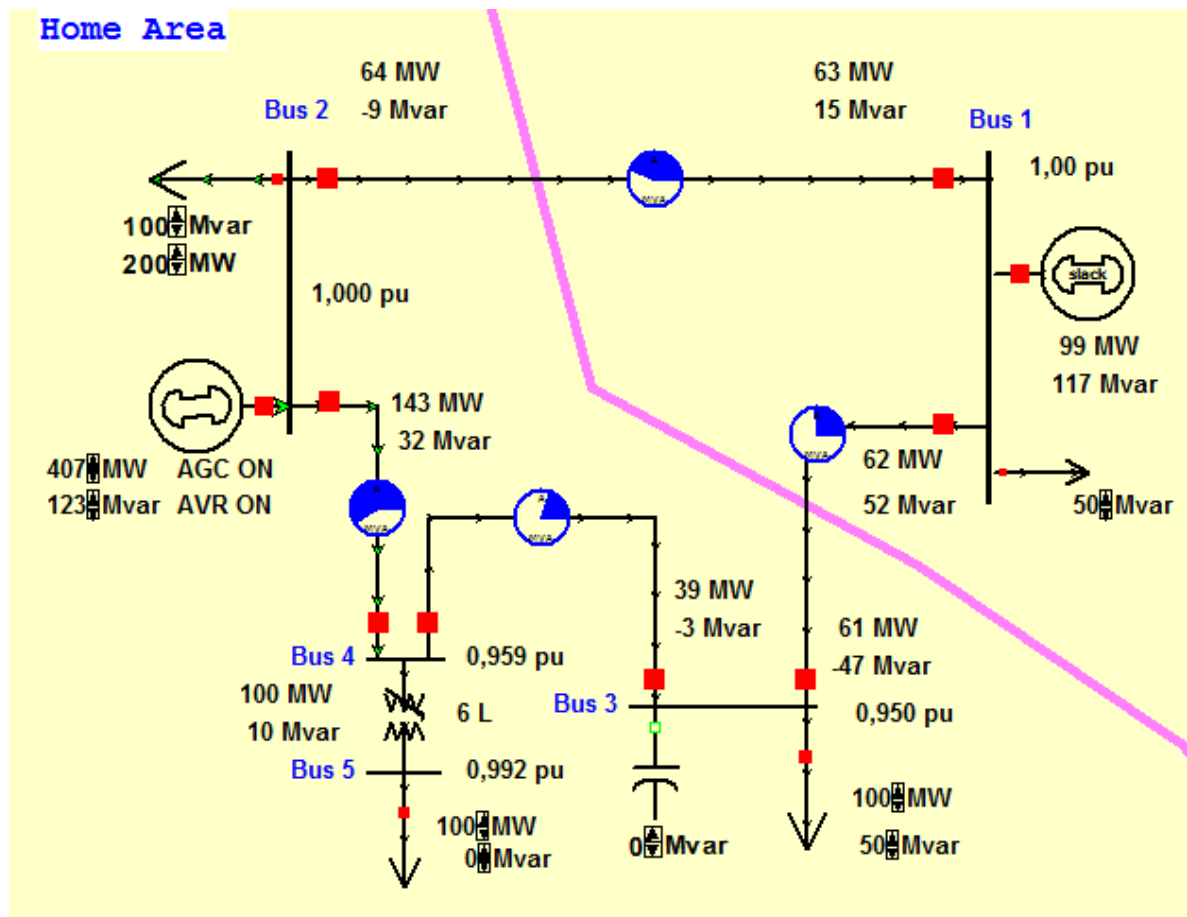
Para este trabajo se realizó un incremento de la variable de potencia reactiva específicamente y se analizó que tan sensible a este incremento son las tensiones nodales y flujos de potencia reactiva del sistema

Un indicador de sensibilidad debe tener la capacidad de dar a interpretar sus resultados de la manera más sencilla y óptima posible, por medio de herramientas digitales como gráficos tablas de datos entre otros métodos de tabulación y clasificación. Para este proyecto se optó por gráficos estadísticos para la visualización de resultados.

2.2 SENSIBILIDAD EN UN SISTEMA DE POTENCIA DE CINCO NODOS

En la siguiente imagen se puede observar la simulación de un sistema eléctrico de potencia de cinco nodos, con cuatro cargas instaladas, este ejemplo servirá para ilustrar la sensibilidad que tiene este pequeño sistema frente a la variación de reactivos en las cargas.

Figura 3. Sistema de cinco nodos

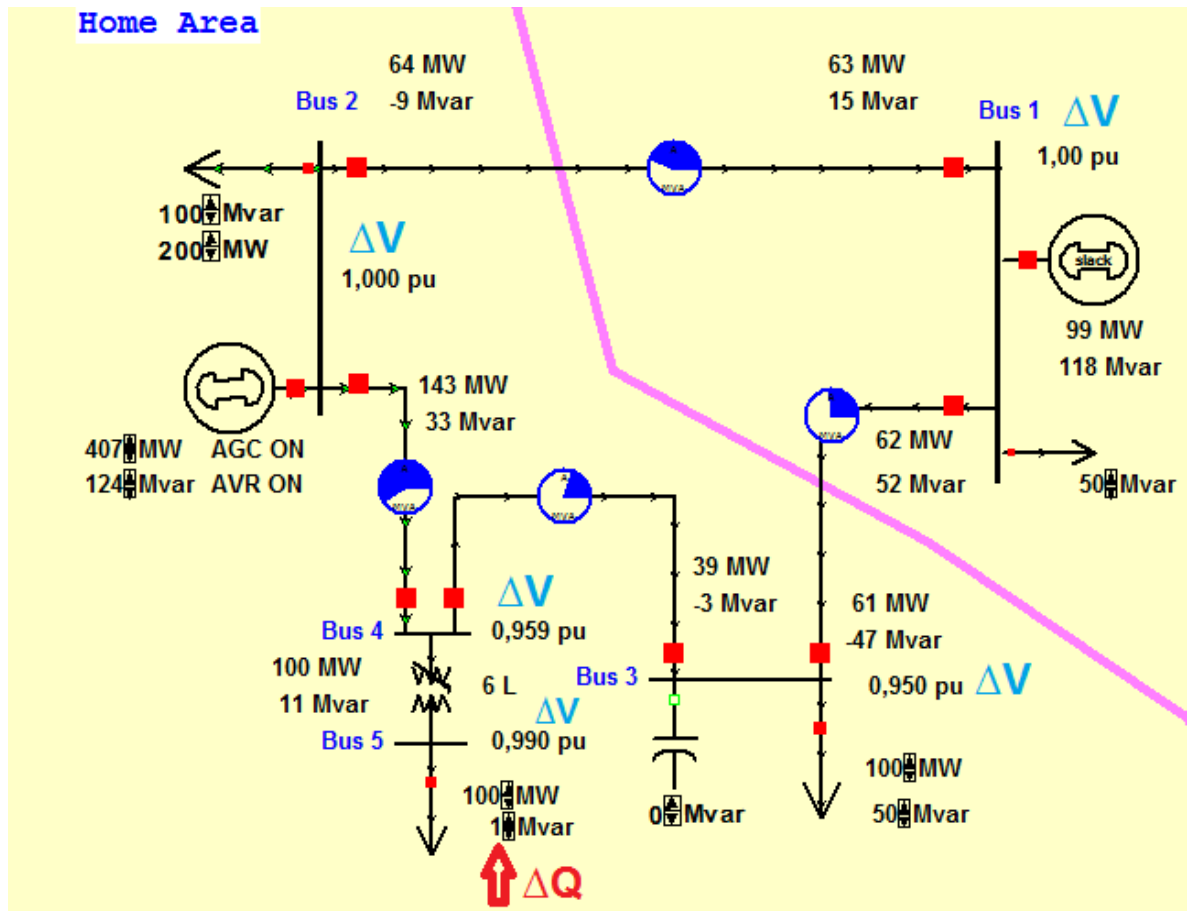


A continuación se realizarán cuatro casos que corresponden cada uno al aumento de reactivos en cada una de las cargas.

Caso1.

En la siguiente figura se puede observar el sistema anterior con una variación de 1MVAR en la carga conectada a la barra número 5.

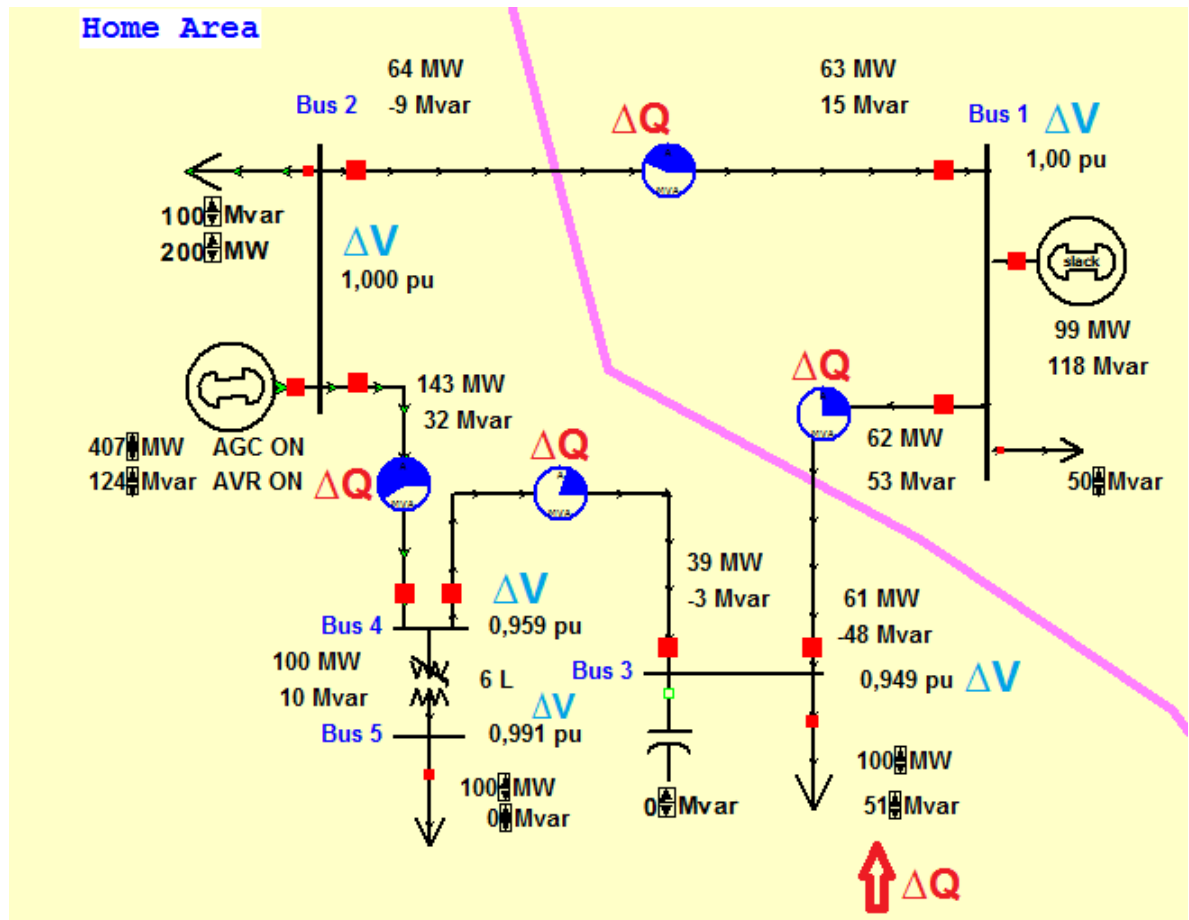
Figura 4. Sistema de cinco nodos con aumento de reactivos caso1



Caso 2.

En la siguiente figura se observa una variación de 1MVAR en la carga conectada a la barra número 3.

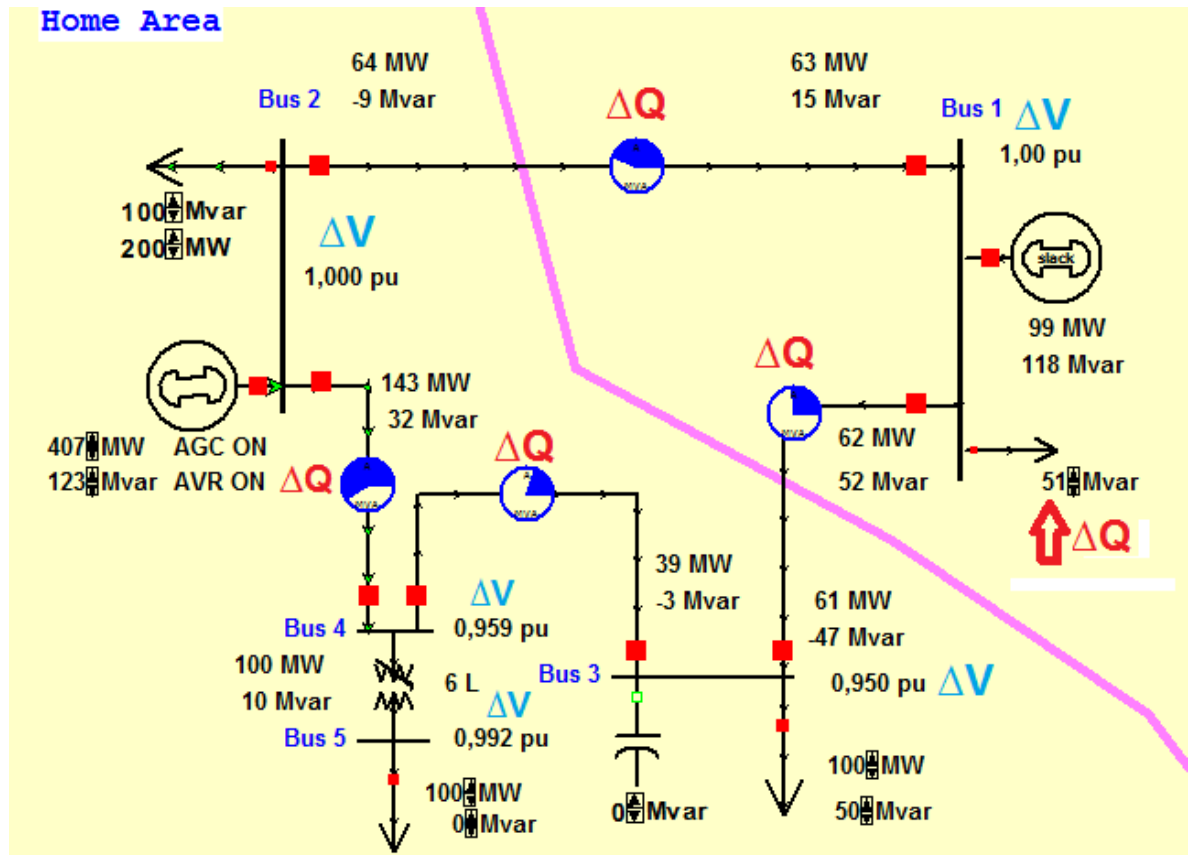
Figura 5. Sistema de cinco nodos con aumento de reactivos caso 2



Caso 3.

En la siguiente figura se observa una variación de 1MVAR en la carga conectada a la barra número 1.

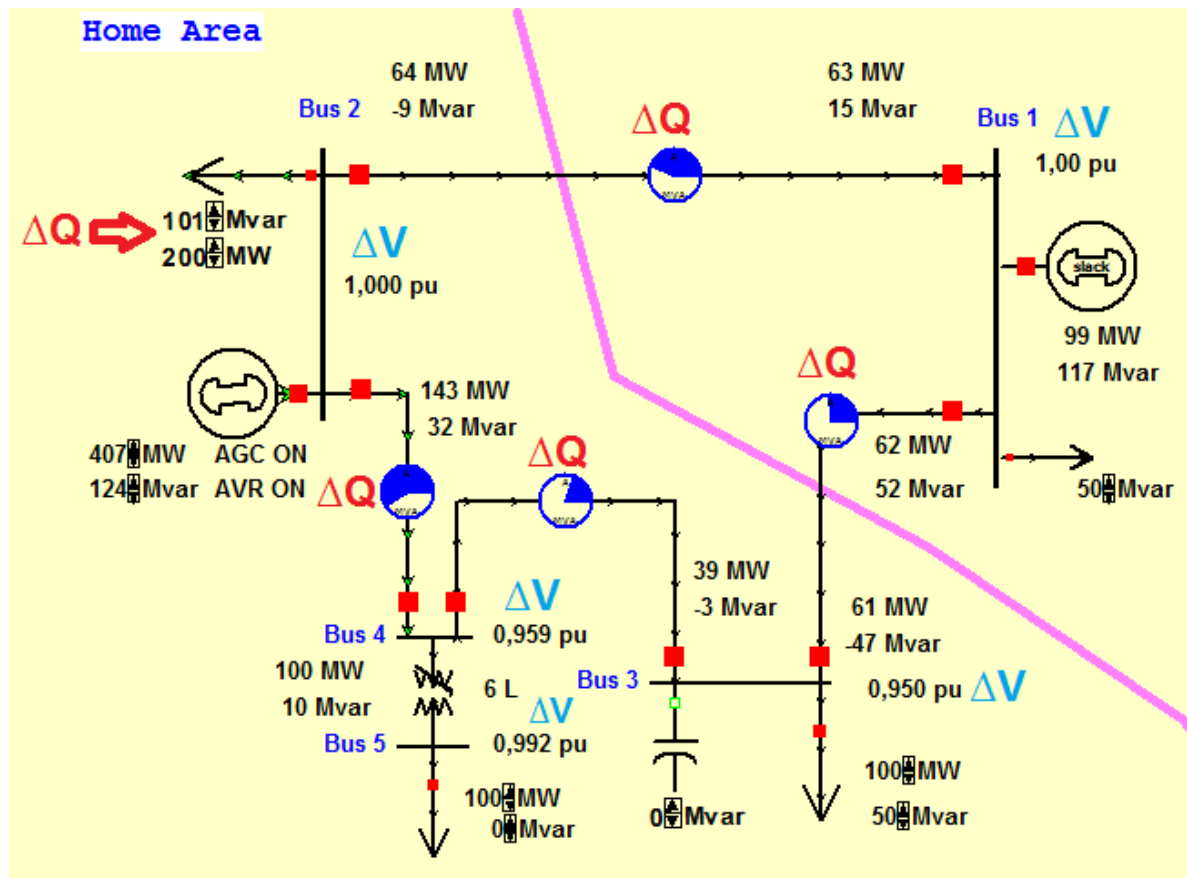
Figura 6. Sistema de cinco nodos con aumento de reactivos caso 3



Caso 4.

Por ultimo en esta figura se observa una variación de 1MVAR en la carga conectada a la barra número 2.

Figura 7. Sistema de cinco nodos con aumento de reactivos caso 4



En las figuras anteriores se observa que el sistema en el caso tensiones no sufre mayores variaciones siendo el caso 2 el que más genera un delta más elevado en la barra número 4, en el caso de flujo de potencia reactiva el sistema también presenta algunas fluctuaciones con respecto a los valores bases las líneas que mas varían su flujo de potencia en cada uno de los casos son las conectan las barras 2 y 4 y la barras 1 y 3 las al igual, la línea que comunica los nodos 1 y 2 no sufre ningún cambio en ninguno de los casos.

CAPÍTULO 3

3. SIMULACION DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE PEREIRA

3.1 PROCEDIMIENTO

Como se ha mencionado anteriormente el análisis de las variables de un SEP es fundamental para garantizar su confiabilidad y óptimo funcionamiento es por esto que hay empresas dedicadas al estudio de dichas variables. Con el fin de que el análisis fuese más útil y aplicable se realizó en el sistema eléctrico de la ciudad de Pereira con los datos de carga de la hora 21 considerada una hora pico o de alto consumo donde los elementos del sistema se encuentran más exigidos debido a la demanda de carga en la que se encuentra en dicha hora.

Definida la hora 21 y los datos de carga que esta hora tiene se procedió al montaje de una aproximación del sistema eléctrico de Pereira en el software NEPLAN. La red interconectada de la ciudad de Pereira está conformada por:

Veintidós barras con niveles de tensión de 115kv, 33kv y 13.2kv, trece líneas de transmisión, entre las cuales se encuentran, 3 líneas de 115kv, 7 líneas de 33kv. Se incluyen dos líneas de 13.2kv que interconectan el sistema con las plantas de generación de Libaré y de Belmonte.

3.2 CARACTERISTICAS DE LOS ELEMENTOS DEL SEP DE PEREIRA

Tabla 3. Datos generadores.

Central	Vel. RPM	S MVA	V KV	Conexión	rs (p.u.)	Xs (p.u.)	Xs' (p.u.)	Xs''(p.u.)	Z2 (p.u.)	X0 (p.u.)
Libaré	720	6,25	13,8	Yn		1,24	0,28	0,18		
Belmonte	450	2,35	2,4	Y	0,012	1,20	0,28	0,25	0,025+j0,3	0,19
	450	2,35	2,4	Y	0,012	1,20	0,28	0,25	0,025+j0,3	0,19

Tabla 4. Datos línea.

línea	longitud (mts)	voltaje (KV)	Conductor	Capacidad (A)	Z1=Z2 (Ω/KM)	Zo (Ω/KM)
Rosa-DQBRD	4100	115	336,4 MCM	527	0,19+J0,4976	0,4490+J1,5834
Rosa-Ventorrillo	4106	33	336,4 MCM	527	0,19+J0,4056	0,3676+J1,5352
Rosa-Cuba	7800	115	336,4 MCM	400	0,19+J0,4976	0,3676+J1,5352
Rosa-Centro	3600	33	477,0 MCM	600	0,1218+J0,3931	0,3994+J1,6796
Cuba-Naranjito	1700	33	477,0 MCM	600	0,1218+J0,3931	0,3994+J1,6797
Cuba-DQBRD	4410	33	336,4 MCM	527	0,19+J0,4056	0,3676+J1,5352
Cuba-Belmonte	4480	13,2	4/0 ACSR	502	0,3679+J0,472	0,5740+J1,6000
Ventorrillo-Libaré	1000	13,2	4/0 ACSR	300	0,3679+J0,472	0,5740+J1,6000
Ventorrillo-Naranjito	1700	33	477 ACSR	600	0,1218+J0,3931	0,3994+J1,6796
DQBRD-Cartago	26500	115	336,4 MCM	527	0,19+J0,4976	0,4490+J1,5834
DQBRD-Centro	400	33	477,4 MCM	600	0,1218+J0,3931	0,3994+J1,6796
DQBRD-Pavas	10000	33	336,0 MCM	530	0,19+J0,4976	0,4490+J1,5834

Tabla 5. Datos transformador

Subestación	Transformador	Capacidad (MVA)	Voltios (KV)	X0=X1=X2 (P.U.)	Conexión
La Rosa	Banco 1	60	115/33	0,098	YNyn0
	Banco 2	60	115/33	0,0937	YNyn0
Dosquebradas	T1	12,5	33/13,2	0,0984	DYn11

	T2	12,5	33/13,2	0,1005	DYn11
	T3	75	115/33	0,1176	YNyn0
Centro	T1	25	33/13,2	0,0875	DYn5
Belmonte	T1	6,25	13,2/2,4	0,0723	YNd11
Ventorrillo	T1	5	33/13,2	0,064	DYn5
	T2	12,5	33/13,2	0,0894	DYn11
	T3	10	33/13,2	0,094	DYn11
	T4	12,5	33/13,2	0,088	DYn11
Cuba	T1	20	33/13,2	0,0887	DYn5
	T2	20	33/13,2	0,0884	DYn5
	T3	75	115/33	0,125	YNyn0
Naranjito	T1	25	33/13,8	0,125	DYn5
Pavas	T1	6,25	33/13,2	0,0875	DYn11

Los valores de los elementos están en p.u y tienen como base los datos nominales de estos mismos.

Se tomó el nodo de la Rosa como *slack* debido a que es el nodo que mayor generación de potencia aporta al sistema eléctrico de potencia de Pereira, además de ser también el nodo más interconectado del sistema.

Con el fin de que la aproximación del SEP de Pereira fuese más práctica y compacta se realizaron algunas modificaciones a los nombres de los nodos y elementos del sistema en las siguientes tablas se especificaran las convenciones y nombres que se optaron para la simulación realizada en NEPLAN.

Tabla 6. Nomenclatura líneas.

LINEAS	
NOM-REAL	NOM-SIMULACION
ROSA-DQ/B	DQ-RS
ROSA-VENTORRILLO	RO-VE
ROSA-CUBA	RO-CU
ROSA-CENTRO	CENROS
CUBA-NARANJITO	CU-NA
CUBA-DQ/B	CU-DQ
CUBA-BELMONTE	CU-BE
VENTORRILLO-LIBARE	VE-LI
VENTORRILLO-NARANJITO	VE-NA
DQ/B-PAVAS	PV-DQ
DQ/B-CENTRO	CDQ
PAVAS-CARTAGO	CA-PV
DQ/B-VENTORRILLO	DQ-VE

Tabla 7. Nomenclatura transformadores.

TRANSFORMADORES		
SUBESTACION	NOM-REAL	NOM-SIMULACION
LA ROSA	BANCO 1	TRAFOROS1
	BANCO 2	TRAFOROS2
DOSQUEBRADAS	T1	TRAFODQ1
	T2	TRAFODQ2
	T3	TRAFODQ3
CENTRO	T1	TRAFOCEN
BELMONTE	T1	TRAFOBE
VENTORRILLO	T1	TRAFOVE1
	T2	TRAFOVE2
	T3	TRAFOVE3
CUBA	T1	TCU1
	T2	TCU2
	T3	TCU3
NARANJITO	T1	TRAFONA
PAVAS	T1	TRAFO PAVAS

Tabla 8. Nomenclaturas generadores.

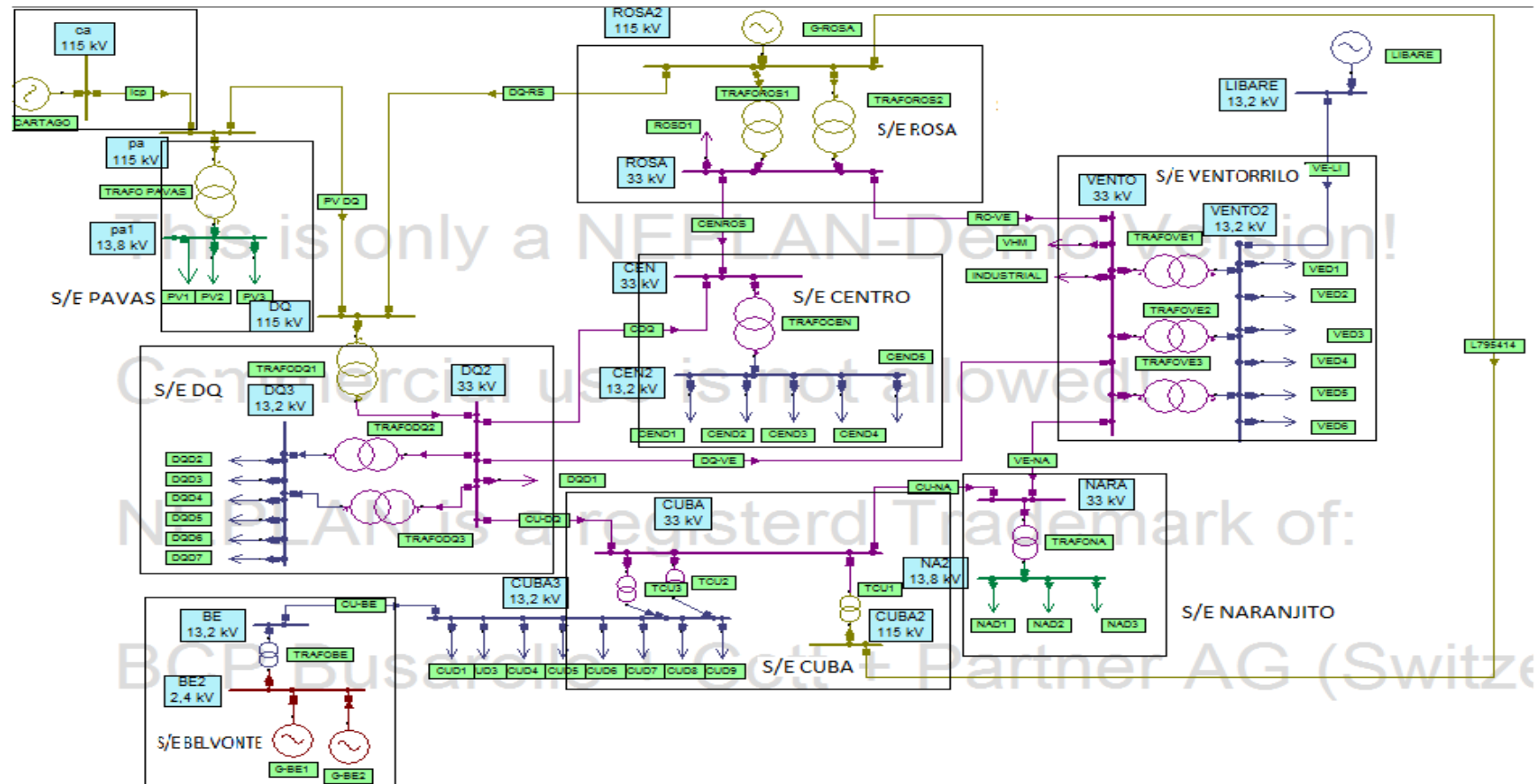
GENERADORES	
NOM-REAL	NOM-SIMULACION
GENERADORES BELMONTE	G-BE1
	G-BE2
GENERADOR LA ROSA	G-ROSA
GENERADOR LIBARE	LIBARE
GENERADOR CARTAGO	CARTAGO

Tabla 9. Nomenclatura nodos

NODOS	
NOM-REAL	NOM-SIMULACION
CARTAGO_115	ca
PAVAS_115	pa
PAVAS_13,8	pa1
DQ/B_115	DQ
DQ/B_33	DQ2
DQ/B_13,2	DQ3
BELMONTE_13,2	BE
BELMONTE_2,4	BE2
CUBA_13,2	CUBA3
CUBA_33	CUBA
CUBA_115	CUBA2
NARANJITO_33	NARA
NARANJITO_13,8	NA2
CENTRO_33	CEN
CENTRO_13,2	CEN2
ROSA_115	ROSA2
ROSA_33	ROSA
VENTORRILLO_13,2	VENTO2
VENTORRILLO_33	VENTO
LIBARE_13,2	LIBARE

3.33.3 SISTEMA DE PEREIRA

Figura 8. Topología del sistema eléctrico de potencia de Pereira, caso original



3.43.3 PUESTA A PUNTO CASO BASE

El paso que se siguió después del montaje del SEP de Pereira con los datos de carga ya seleccionados en NEPLAN, fue normalizar dentro de los límites de tensiones y cargabilidad establecido a esto se le conoce como ajuste del caso base. Para esto el primer paso fue ajustar la potencia reactiva presente en el nodo de carga de Cartago (nodo PV del sistema) el cual debe estar a la mitad de la potencia activa del mismo nodo, para este caso la potencia activa en Cartago era de 30MW, mientras que la potencia reactiva estaba alrededor de los 2.31MVAR con un desfase del 84,6% con respecto al valor deseado de 15MVAR.

El ajuste de reactivos se logra modificando brevemente el valor de tensión de operación del generador de Cartago, pasando de un 100% a 101,536% con este ajuste generalmente se normalizan los perfiles de tensión y cargabilidad violados en el sistema.

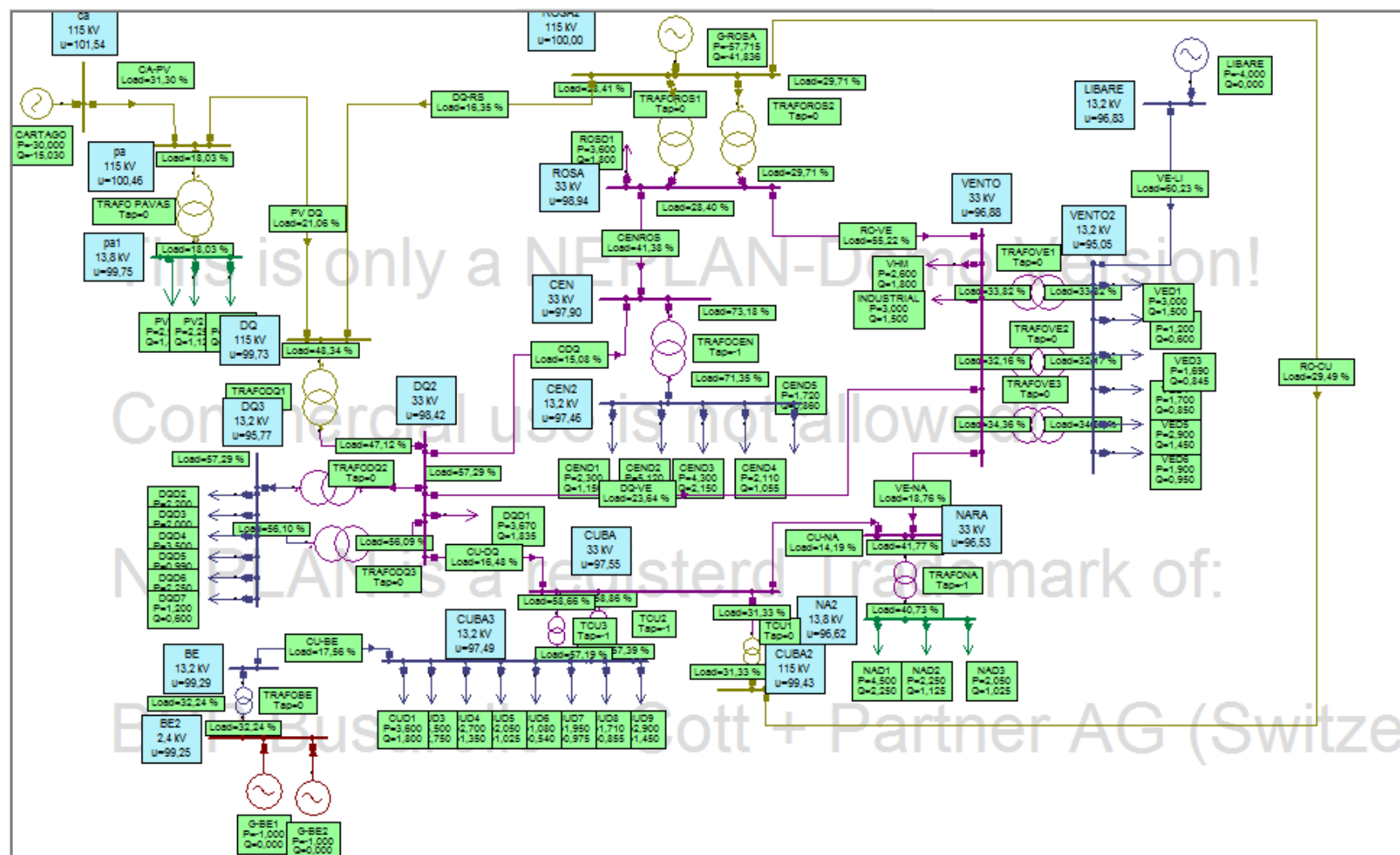
Cuando esta inyección no es suficiente se procede a modificar la posición de los taps de los transformadores estos direccionan el flujo de potencia reactiva y con esto se pueden suplir los déficits de reactivos y mejorar los parámetros en nodos y elementos

Si con estas dos acciones aún quedan elementos con valores fuera del rango permitido se prosigue a inyectar reactivos de forma externa por medio de bancos de condensadores en zonas específicas; este método de inyección tiene un costo económicamente muy elevado.

Para el caso de esta simulación no fue necesario la inyección externa de reactivos. Con el ajuste en el generador de Cartago y la modificación de algunos taps de transformadores en específico se logró normalizar todos los perfiles de tensión y cargabilidad dentro de los límites permitidos.

La siguiente figura muestra la simulación del caso base sistema eléctrico de Pereira:

Figura 9. Topología del sistema eléctrico de potencia de Pereira caso base



La siguiente tabla muestra la variación de tensión de caso base con respecto al caso original. Los datos que se encuentran en rojo corresponden a las tensiones que inicialmente estaba violando los límites de regulación; como se puede observar todas estas se encontraban por debajo del 95%, el cual es el límite mínimo permitido para las tensiones de nodo.

Tabla 10. Datos tensiones.

CASO ORIGINAL		CASO BASE	
Nodo	u	Nodo	u
Nombre	%	Nombre	%
BE	94,44	BE	100,57
BE2	95	BE2	100,53
ca	100	ca	101,47
CEN	96,81	CEN	98,85
CEN2	94,23	CEN2	98,94
CUBA	95,84	CUBA	99,84
CUBA2	99,11	CUBA2	98,64
CUBA3	92,02	CUBA3	98,78
DQ	99,57	DQ	99,78
DQ2	96,77	DQ2	99,5
DQ3	93,92	DQ3	99,16
LIBARE	95	LIBARE	99,64
NA2	90,81	NA2	104,71
NARA	94,62	NARA	97,17
pa	99,54	pa	100,4
pa1	98,6	pa1	99,46
ROSA	98,29	ROSA	99,45
ROSA2	100	ROSA2	100
VENTO	95,27	VENTO	97,71
VENTO2	92,95	VENTO2	97,92

La siguiente tabla muestra la variación de flujo de potencia reactiva del caso base con respecto al caso original, para que el flujo de potencia reactiva este dentro de la regulación no debe pasar el límite del 100% con respecto a su valor base.

Tabla 11. Datos potencia reactiva

CASO ORIGINAL		CASO BASE	
Elemento	Q	Elemento	Q
Nombre	MVar	Nombre	MVar
CA-PV	0,609	CA-PV	15,004
CARTAGO	0,237	CARTAGO	-15,004
CDQ	0,362	CDQ	6,385
CENROS	8,123	CENROS	1,225
CU-BE	0,346	CU-BE	0,103
CU-DQ	3,25	CU-DQ	4,371
CU-NA	3,821	CU-NA	9,406
DQ-RS	25,807	DQ-RS	11,292
DQ-VE	5,297	DQ-VE	6,873
G-ROSA	-68,159	G-ROSA	-54,14
PV DQ	7,304	PV DQ	8,015
RO-CU	20,328	RO-CU	35,403
RO-VE	10,109	RO-VE	2,936
TCU1	20,007	TCU1	34,802
TCU2	8,797	TCU2	8,83
TCU3	8,768	TCU3	8,8
TRAFO PAVAS	6,543	TRAFO PAVAS	6,538
TRAFOCEN	7,458	TRAFOCEN	7,379
TRAFODQ1	18,392	TRAFODQ1	19,117
TRAFODQ2	3,684	TRAFODQ2	3,658
TRAFODQ3	3,607	TRAFODQ3	3,581
TRAFONA	7,704	TRAFONA	7,392
TRAFOROS1	10,765	TRAFOROS1	3,639
TRAFOROS2	11,259	TRAFOROS2	3,806
TRAFOVE1	3,171	TRAFOVE1	3,3
TRAFOVE2	1,93	TRAFOVE2	2,009
TRAFOVE3	3,221	TRAFOVE3	3,352
VE-LI	0,395	VE-LI	0,09
VE-NA	3,938	VE-NA	1,758

Como se puede observar en la anterior figura aunque ninguno de los límites viola la regulación si se encuentran muy por debajo del límite máximo lo cual se puede interpretar como una sobre dimensión en los elementos del sistema.

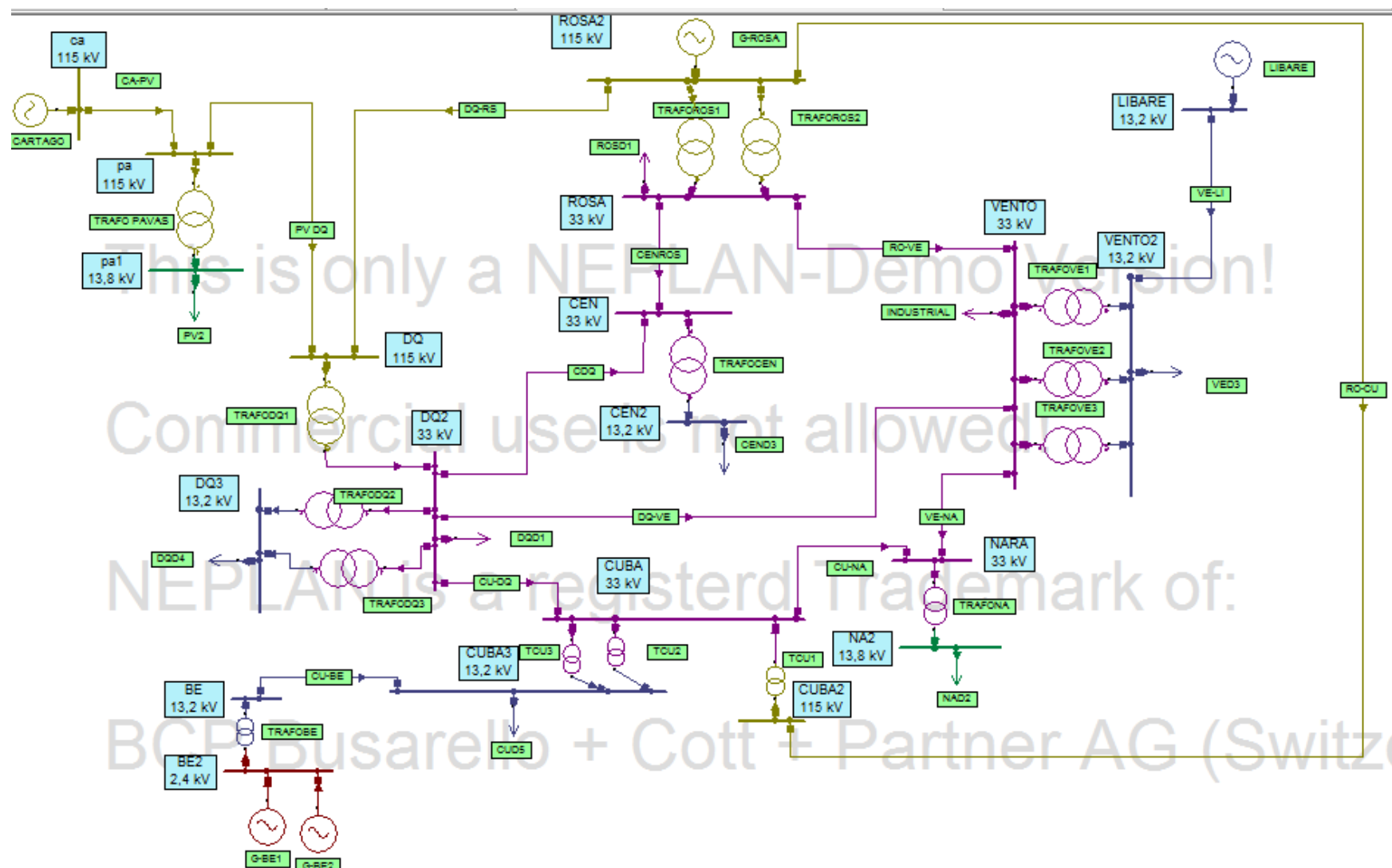
En la siguiente tabla se puede observar la posición en que quedaron los taps de los transformadores, cabe aclarar que la posición original de todos los taps era la numero 0.

Tabla 12. Datos taps.

N-TRAFO	TAP- ACTUAL
ROSA-1	0
ROSA-2	0
DQ1	-1
DQ2	1
DQ3	1
CEN	-1
BE	0
TCU1	3
TCU2	-1
TCU3	-1
NA	-4
VE1	-1
VE2	-1
VE3	-1
PAVAS	0

Una vez tenido a punto el caso base se procedió a unificar las cargas es decir en los nodos de carga (CENTRO, ROSA, DQDS, DQ-INDTRL, CUBA, PAVAS, NARANJITO, VENTORRILLO y VE-INDTRL) se sumó el total de la demanda exigida por las cargas y se creó una sola carga con dichos valores.

Figura 10. Topología del sistema eléctrico de potencia de Pereira cargas unificadas



3.53.4 INYECCION DE REACTIVOS EN EL SEP DE PEREIRA

Los transformadores, motores, etc. son consumidores inductivos. Para la formación de su campo magnético estos toman potencia inductiva o reactiva de la red de alimentación. Esto significa para las plantas generadores de energía eléctrica una carga especial, que aumenta cuanto más grande es y cuanto mayor es el desfase. Esta es la causa por la cual se pide a los consumidores o usuarios mantener un factor de potencia cercano a 1. Los usuarios con una alta demanda de potencia reactiva son equipados con contadores de potencia reactiva.

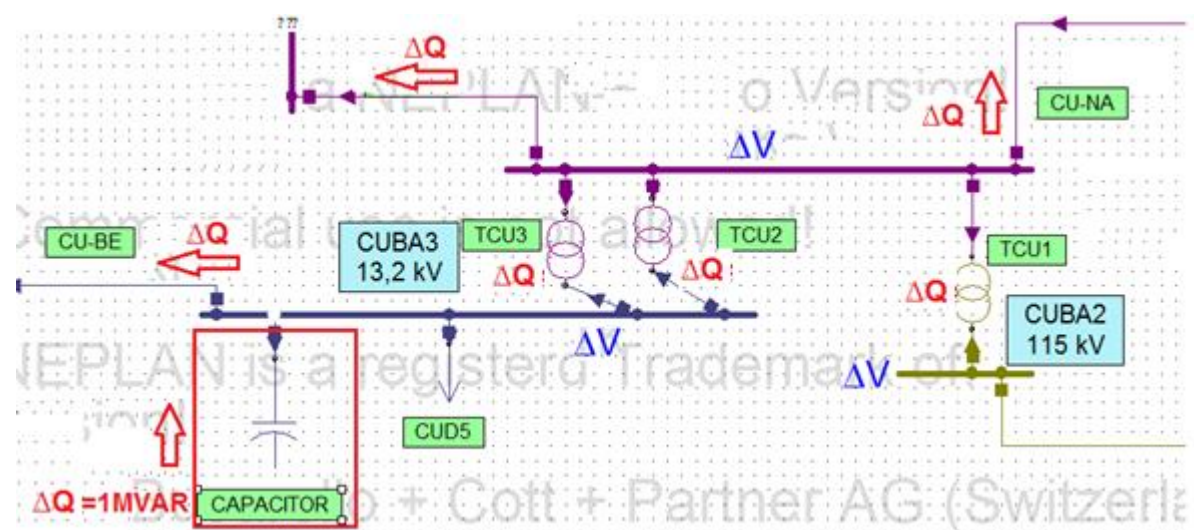
La demanda de potencia reactiva se puede reducir sencillamente colocando condensadores en paralelo a los consumidores de potencia inductiva Q_L . Dependiendo de la potencia reactiva capacitiva Q_C de los condensadores, se anula total o parcialmente la potencia reactiva inductiva tomada de la red. A este proceso se le denomina compensación.

Después de una compensación, la red suministra solamente potencia real, la corriente en los conductores se reduce, por lo que se reducen las pérdidas en éstos. Así se ahorran los costos por consumo de potencia reactiva facturada por las centrales eléctricas [12].

El último paso antes de la toma y análisis de resultados es la inyección de reactivos al sistema, esto se logró por medio de condensadores puestos uno a uno en los nodos de carga.

En la siguiente figura se ilustra la inyección de potencia en el nodo de CUBA

Figura 11. Topología del sistema eléctrico de potencia de Pereira caso aumento de reactivos nodo cuba



CAPÍTULO 4

4. PRUEBAS Y RESULTADOS

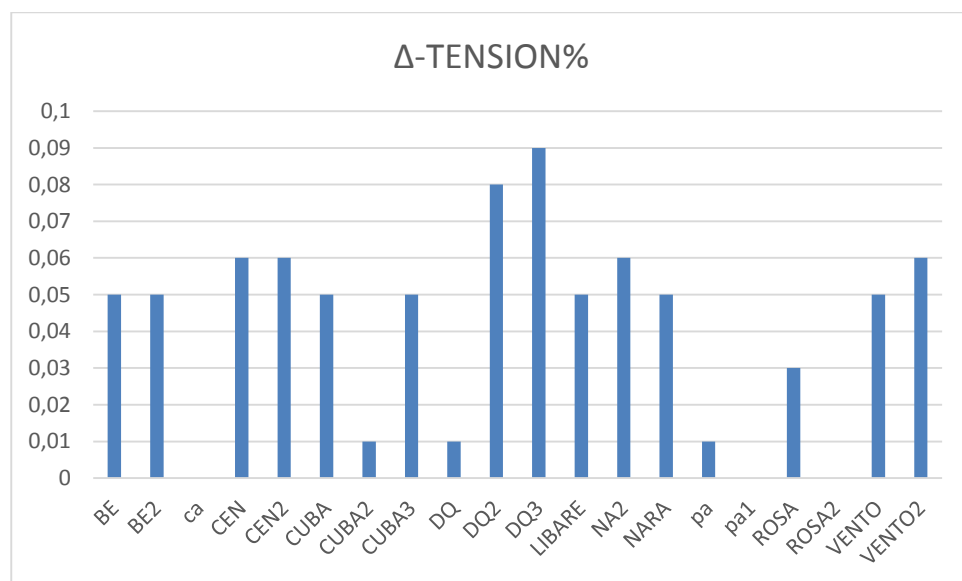
4.14.1 PROCEDIMIENTO

A medida que se fueron aumentando los reactivos en cada carga, se fueron tomando los datos de tensión y flujo de potencia reactiva y analizando los deltas (variación de un valor con respecto a su valor base) de tres casos específicos, los siguientes gráficos representan las situaciones más relevantes de cada caso.

4.2 VARIACIÓN PORCENTUAL DE CADA TENSIÓN DE CADA NODO DEL SISTEMA CON RESPECTO A EL AUMENTO DE REACTIVOS EN LAS CARGAS

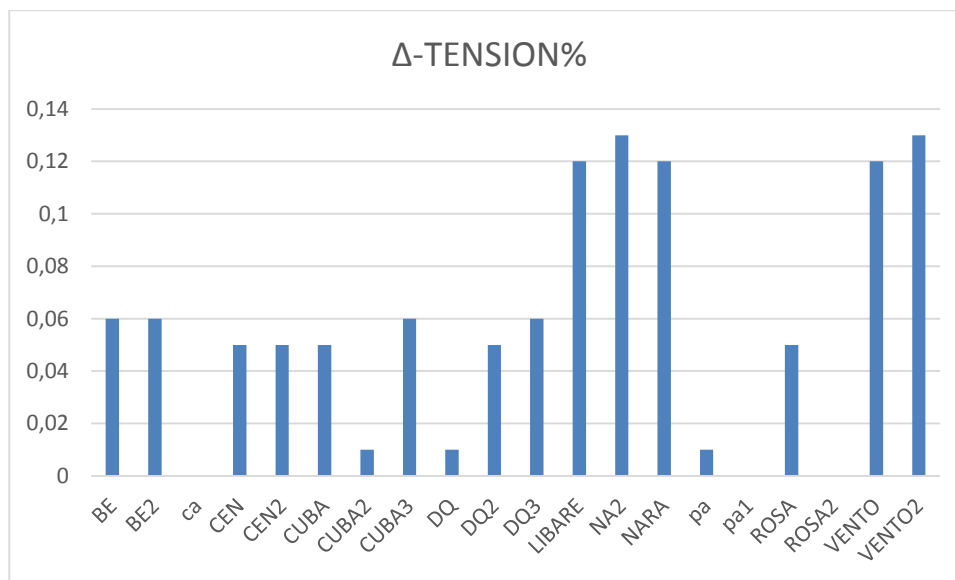
Este primer caso examinó como cada inyección en las cargas por separado influye en el total de nodos del sistema de Pereira.

Figura 12. Inyección de reactivos en el nodo: **DQ2**.



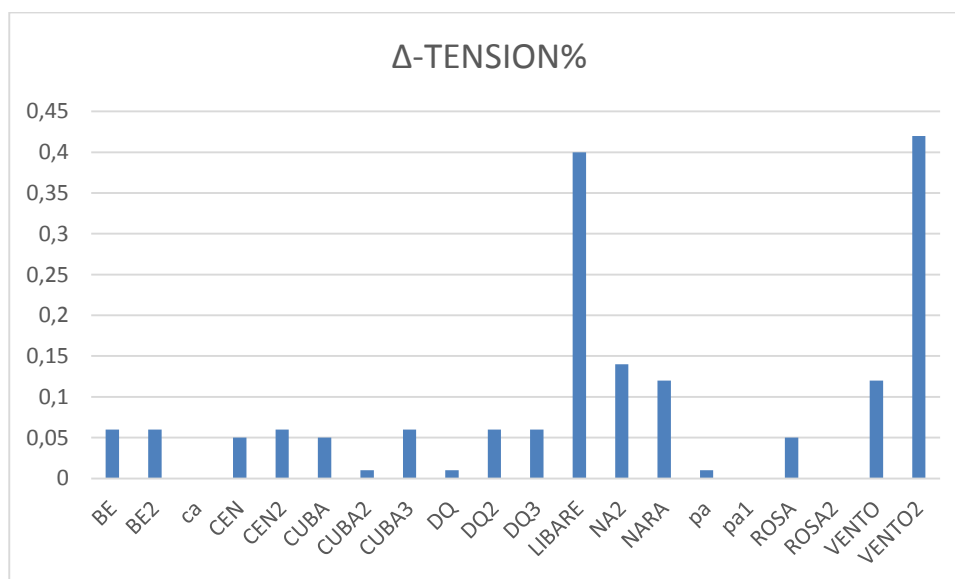
En este grafico se ve que la mayoría de nodos sufre una variación por esta inyección en el nodo de **DQ2**, aunque estos deltas no son muy elevados.

Figura 13. Inyección de reactivos en el nodo: **VENTO**.



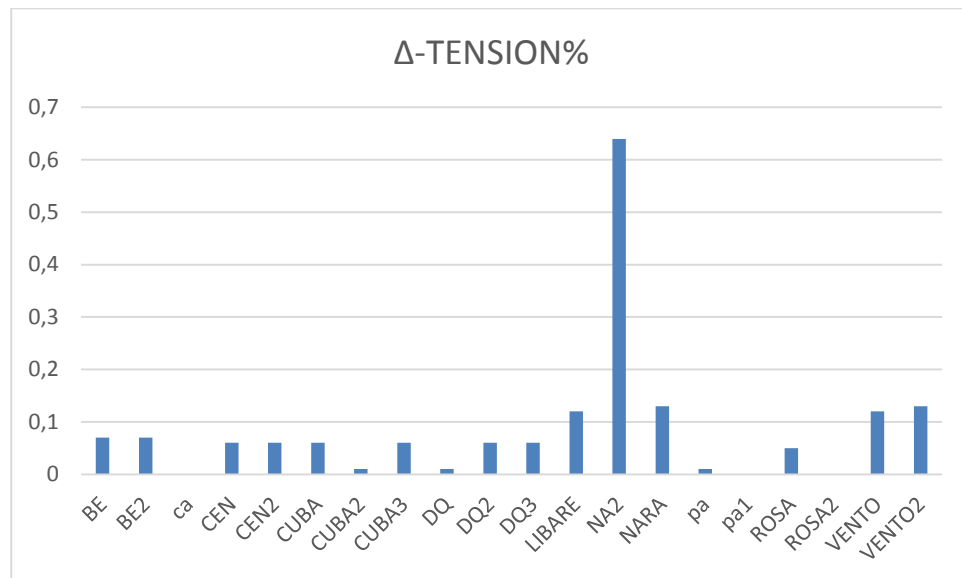
En este gráfico también hay una gran afectación en el número de nodos sensibles a los cambios en el nodo de VENTO, el valor de los deltas también tiene un leve incremento.

Figura 14. Inyección de reactivos en el nodo: **VENTO2**.



Este caso muestra un delta aún más elevado que los casos anteriores y su mayor impacto está ubicado en los nodos de LIBARE y VENTO2.

Figura 15. Inyección de reactivos en el nodo: **NA2**.

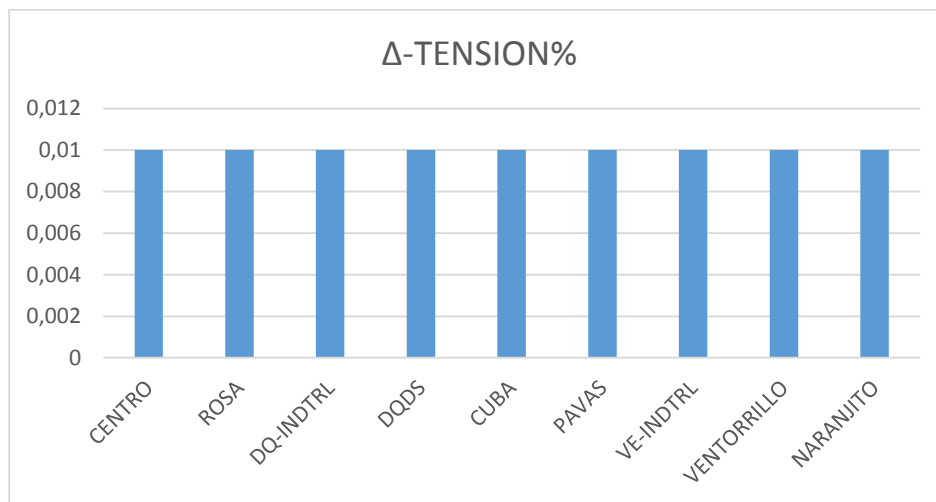


Este es el delta más elevado que se encuentra en este caso, y está ubicado en el nodo de NA2.

4.34.3 VARIACION PORCENTUAL DE TENSIÓN EN LOS NODOS DEL SISTEMA PARA INYECCIÓN DE REACTIVOS EN UN NODO DE CARGA

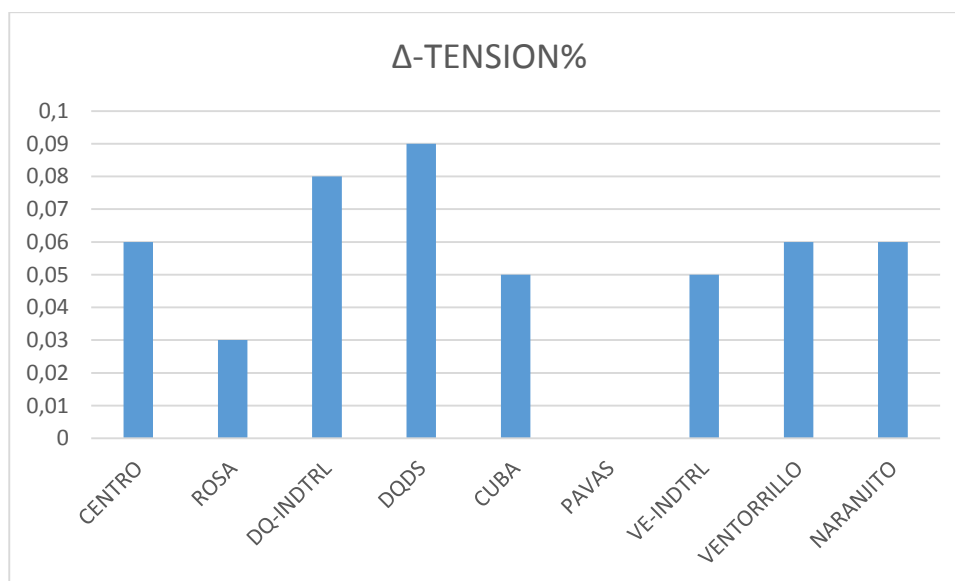
En este segundo caso se analizó la variación de tensión que tiene cada barra del sistema con respecto a cada nodo donde se inyectan reactivos.

Figura 16. Efecto de inyección de reactivos en el nodo: DQ.



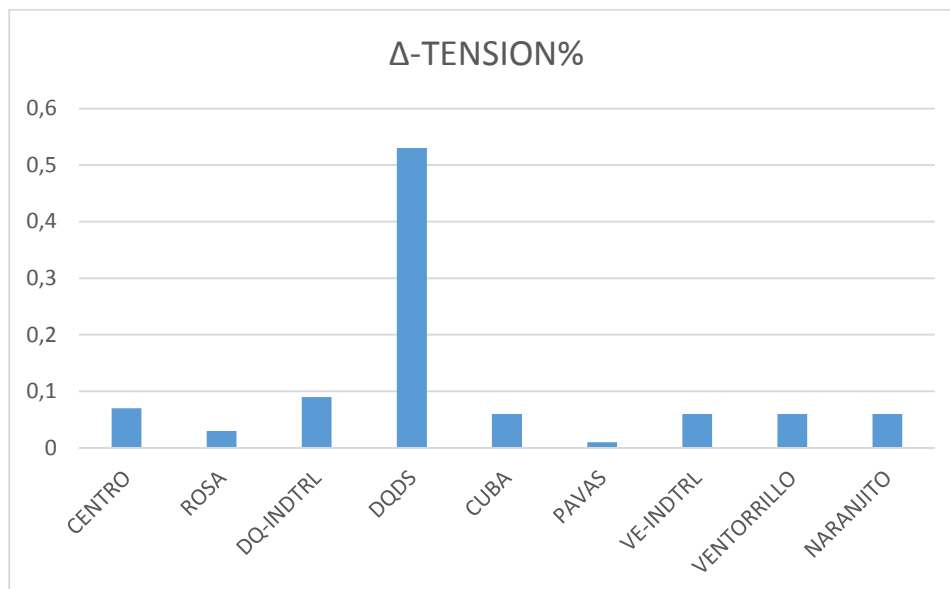
En este caso los 9 nodos de cargas generan un mismo efecto de variación sobre el nodo de DQ

Figura 17. Efecto de inyección de reactivos en el nodo: DQ2.



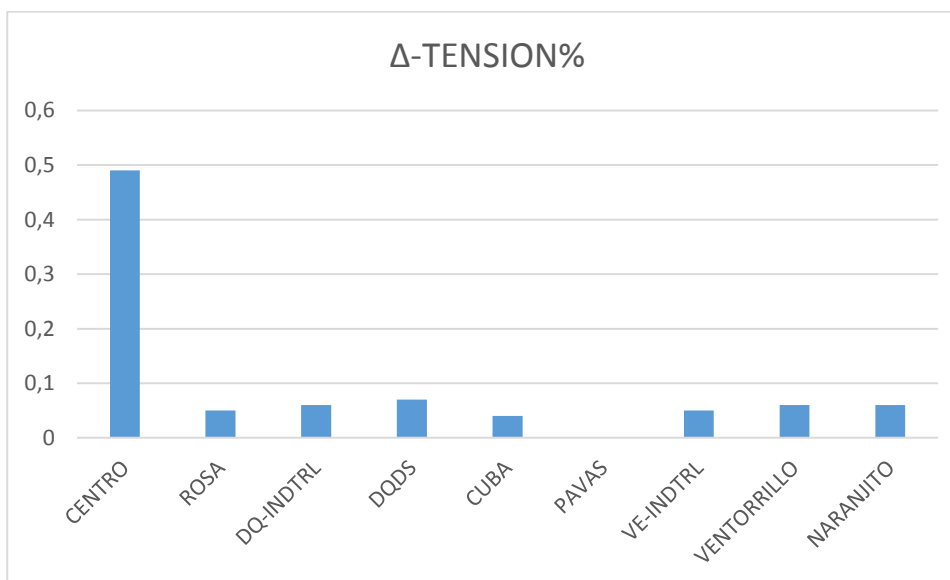
Esta barra también presenta variaciones en la mayoría de casos de aumento de reactivos, solo se mantiene neutra cuando la barra de Pavas aumenta su flujo reactivo.

Figura 18. Efecto de inyección de reactivos en el nodo: **DQ3.**



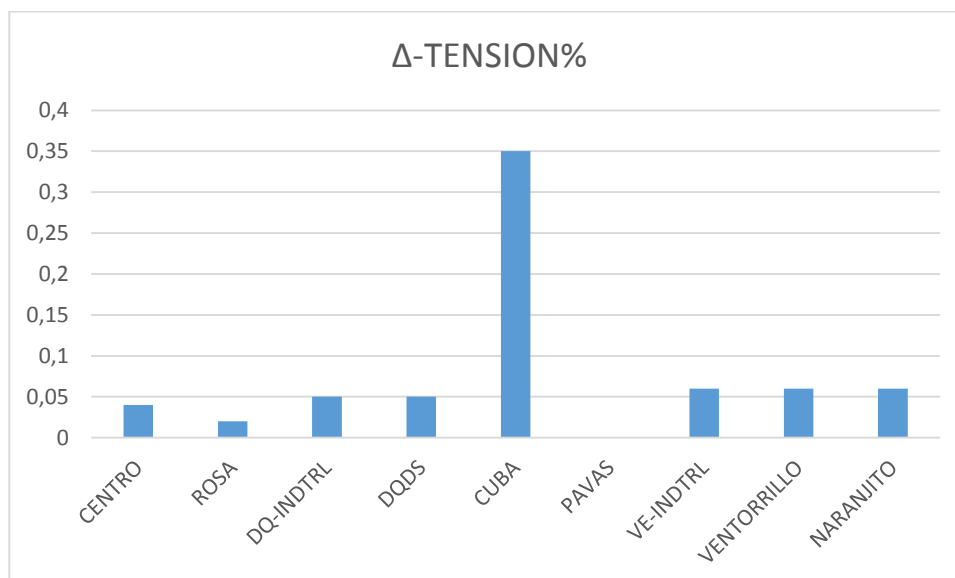
Este nodo es sensible a todas las variaciones de reactivos en los nodos de carga, sobre sale el nodo de DQS donde el delta es el mayor para este caso.

Figura 19. Efecto de inyección de reactivos en el nodo: **CEN2.**



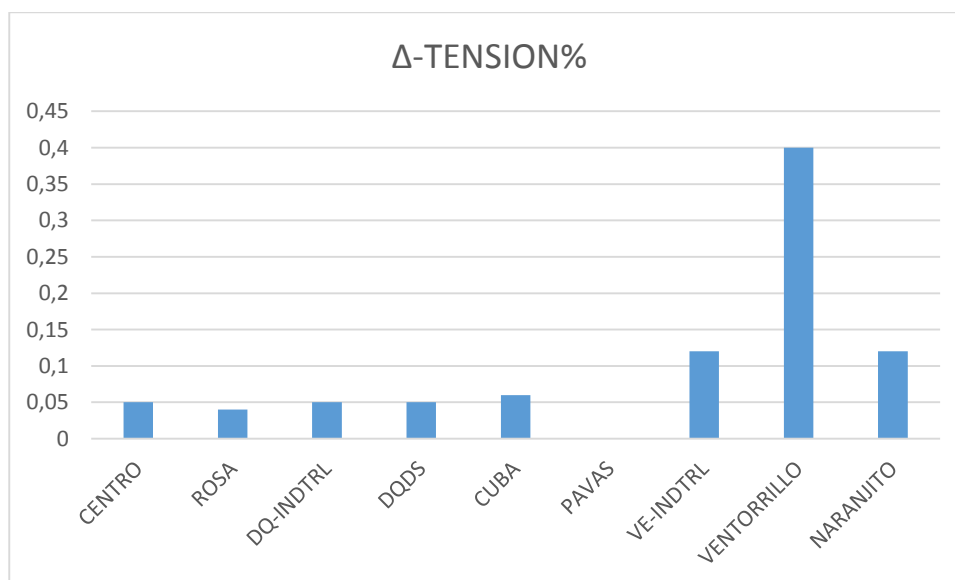
El nodo de CEN2 presenta un delta de tensión equilibrado en casi todos los casos excepto en PAVAS donde la variación es nula y en CENTRO donde el delta es mayor que en los demás casos.

Figura 20. Efecto de inyección de reactivos en el nodo: **BE**



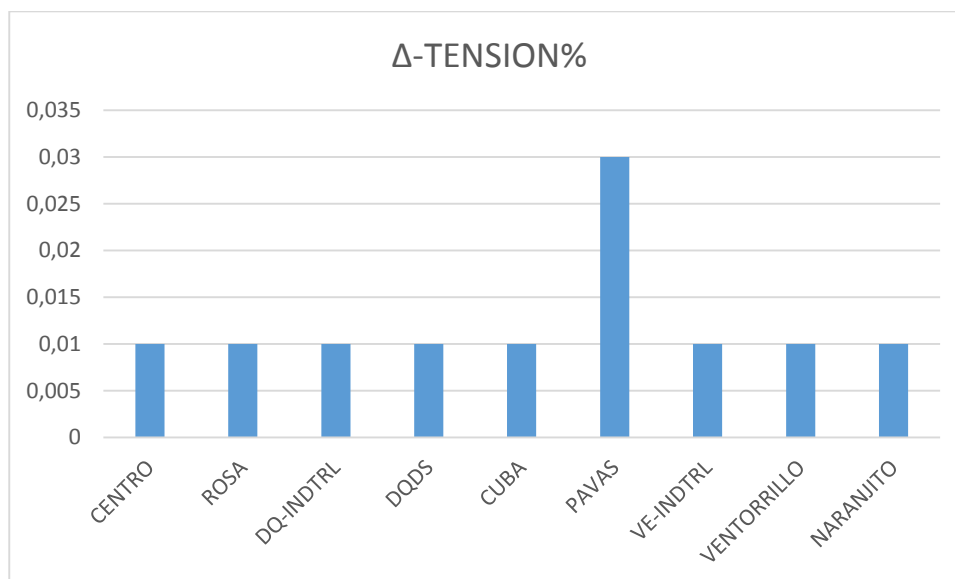
Este nodo tiene su mayor grado de variación a causa de la barra de CUBA mientras que en la ROSA tiene un incremento muy pequeño y PAVAS no causa variación alguna en su nivel de tensión.

Figura 21. Efecto de inyección de reactivos en el nodo: **LIBARE**.



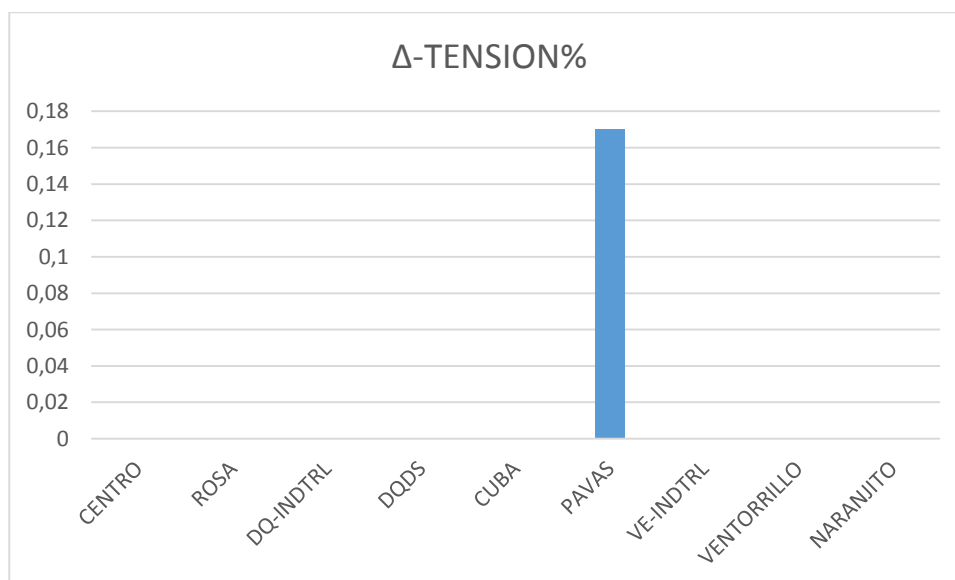
El nodo de Libare es más sensible a la inyección de reactivos en el nodo de VENTORRILLO y es insensible a los reactivos inyectados en el nodo de PAVAS.

Figura 22. Efecto de inyección de reactivos en el nodo: **PA.**



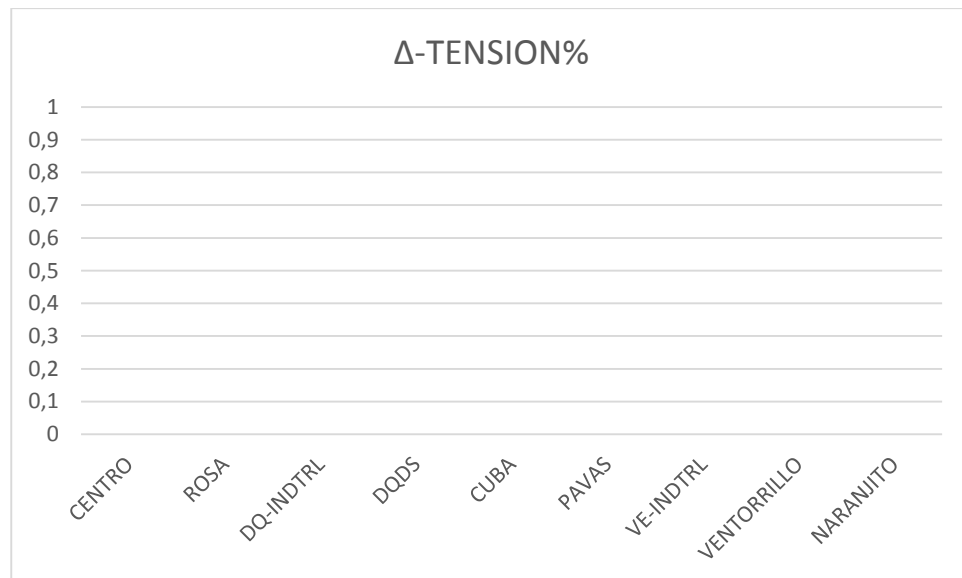
El nodo de PA es sensible a todos los casos de inyección de reactivos pero su incremento porcentual no es muy elevado.

Figura 23. Efecto de inyección de reactivos en el nodo: **PA1.**



Este nodo solo es sensible a la inyección de reactivos en el mismo, para los demás nodos no presenta ninguna variación de tensión.

Figura 24. Efecto de inyección de reactivos en el nodo: **ROSA2**

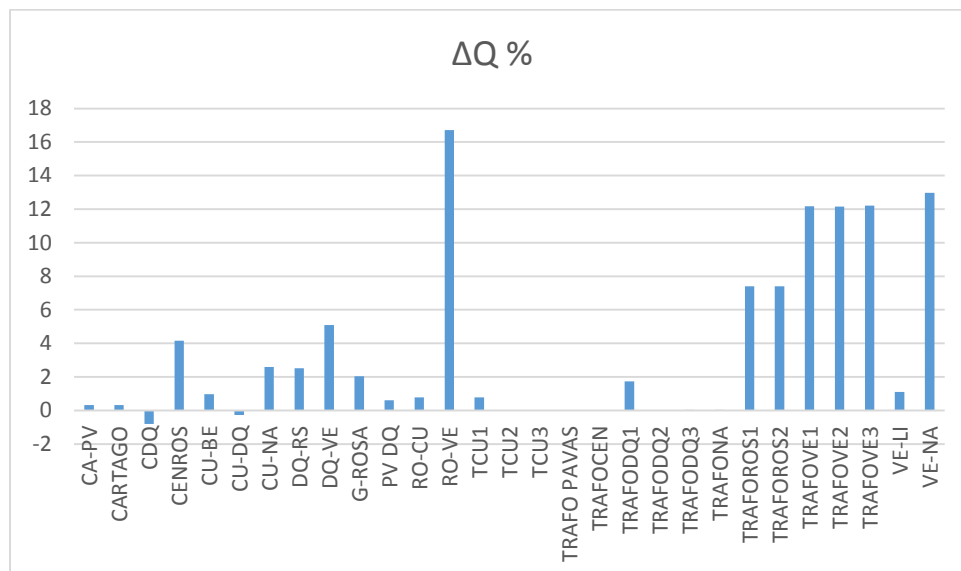


Este nodo no presenta variación a causa de cualquier alteración en los nodos de carga.

4.4 VARIACION PORCENTUAL DEL FLUJO DE POTENCIA REACTIVA EN LOS ELEMENTOS DEL SISTEMA OCASIONADO POR LA INYECCION DE REACTIVOS EN LOS NODOS DE CARGA

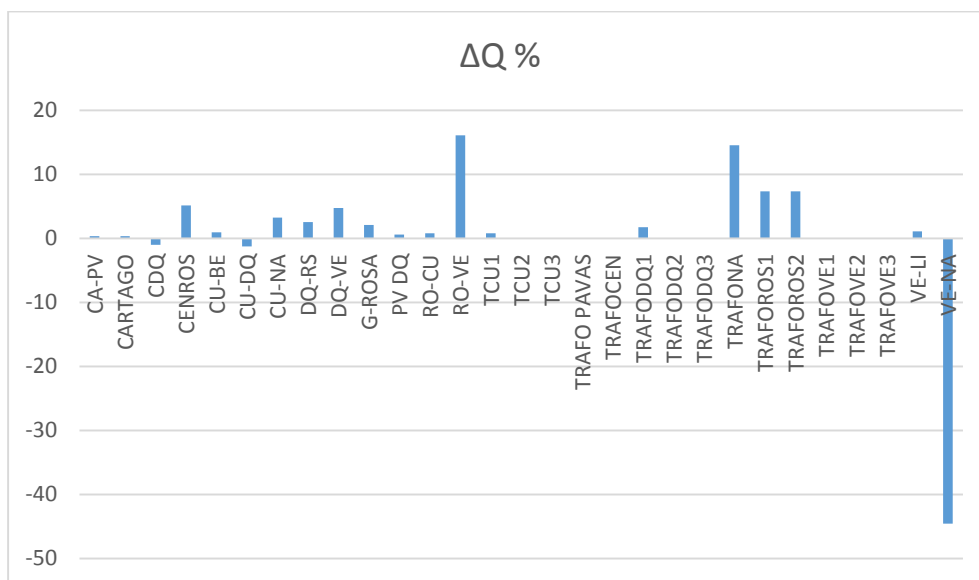
En este tercer caso se mide la variación del flujo de potencia en los elementos del sistema causado por la inyección de reactivos en los nodos de carga.

Figura 25. Variación del flujo de reactivos ocasionado por el nodo: **VENTO**



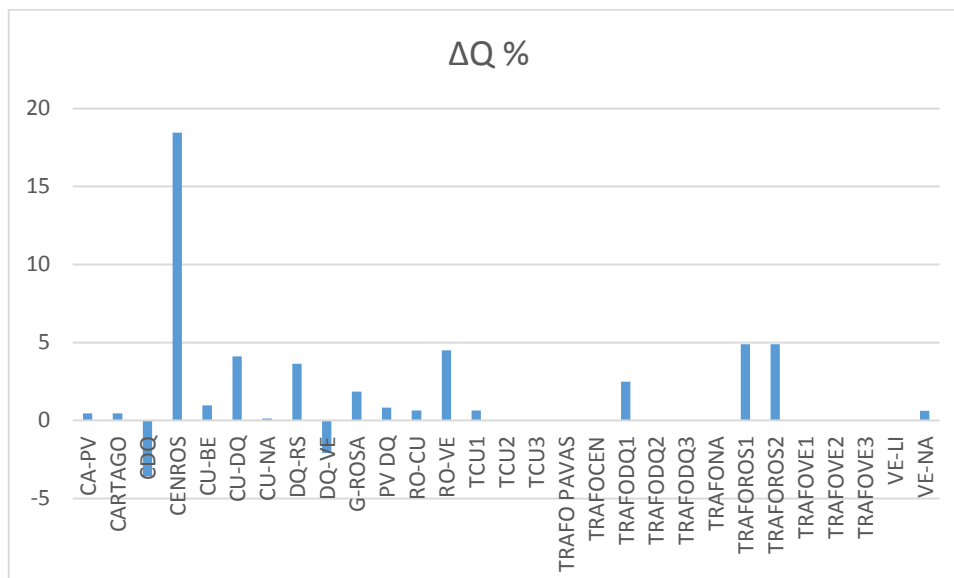
Es uno de los casos donde más cantidad de elementos tienen variación en su flujo de potencia reactiva, la mayoría presenta un delta positivo, excepto el nodo de CDQ el cual presenta un delta negativo.

Figura 26. Variación del flujo de reactivos ocasionado por el nodo: **NA2**



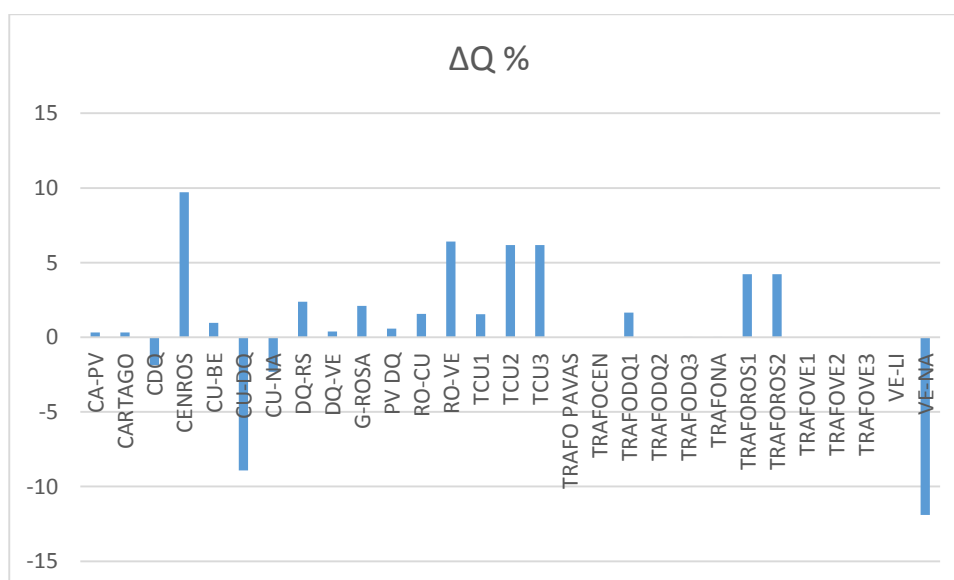
Este nodo afecta principalmente la línea de VE-NA con un delta negativo de un 45% en los demás elementos, el incremento es positivo de menor valor.

Figura 27. Variación del flujo de reactivos ocasionado por el nodo: **DQ2**



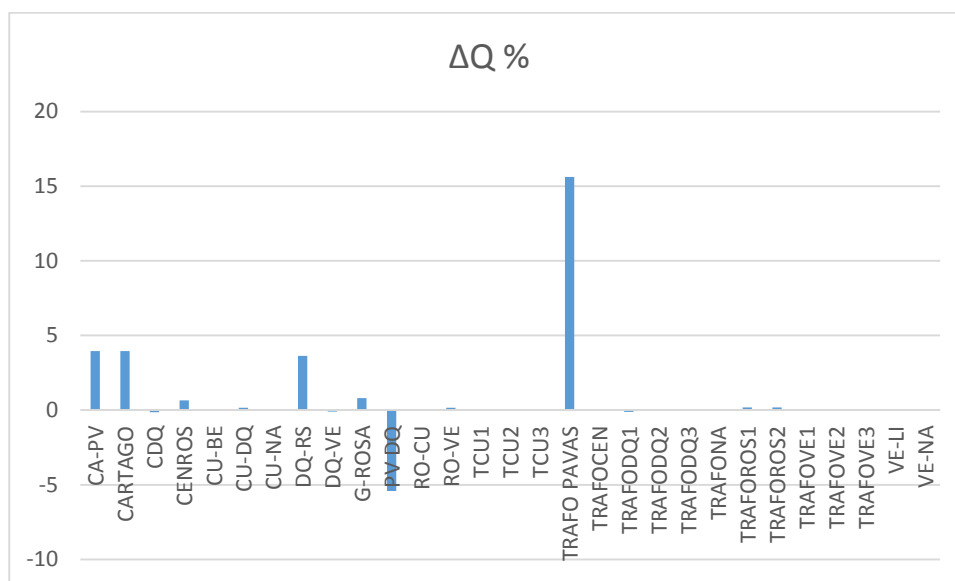
Este nodo genera variación en casi todos los elementos del sistema principalmente en la línea de CENROS, la línea CDQ es el único elemento que tiene una variación negativa.

Figura 28. Variación del flujo de reactivos ocasionado por el nodo: **CUBA3**.



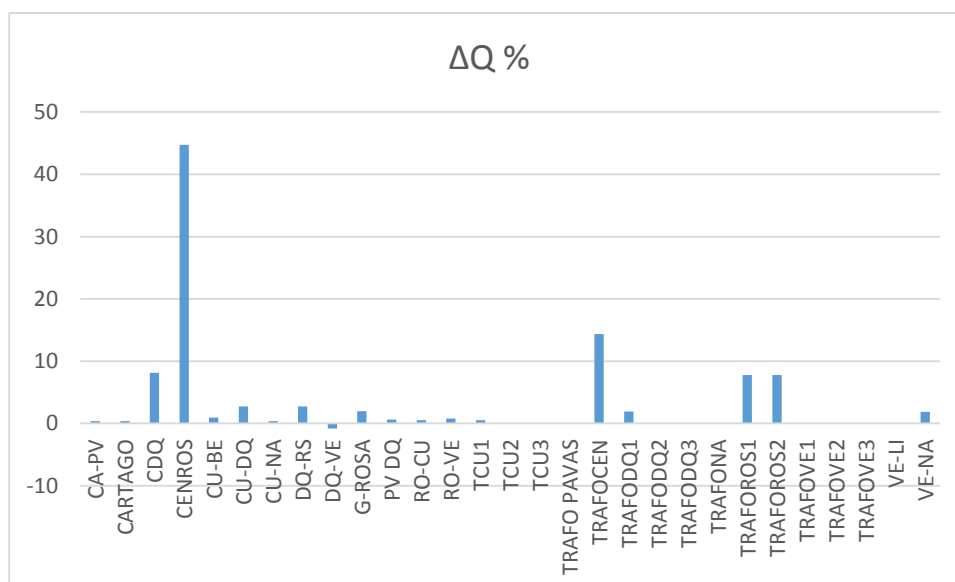
Los reactivos en este nodo hacen decrecer el flujo de reactivos en varias líneas la de mayor sensibilidad en la línea de VE-NA.

Figura 29. Variación del flujo de reactivos ocasionado por el nodo: **PA1**.



La inyección de reactivos en este nodo causa mayor impacto en el transformador de TRAFO PAVAS con un aumento porcentual del 16%, y en la línea PV-DQ genera un delta negativo del 5%.

Figura 30. Variación del flujo de reactivos ocasionado por el nodo: **DQ3**.



Causa la mayor variación porcentual del flujo de reactivos de este caso, esto ocurre en la línea de CENROS.

5. CONCLUSIONES

- En la puesta a punto del caso base se pudo evidenciar que las tensiones de los nodos del SEP Pereira que se encontraban por fuera de los límites establecidos (entre un 100% a un 105%) se controlaban con el accionamiento de los taps de los transformadores que estaban conectados bien sea al mismo nodo afectado o a un nodo geográficamente cercano como por ejemplo el caso del nodo de **NA2**, que su estabilidad de tensión se logra con el manejo de los taps del trafo **TRFONA** conectado directamente al nodo afectado como también la del trafo **TCU1** cercano geográficamente al nodo afectado. Los flujos de potencia reactiva en los elementos del SEP de Pereira aunque experimentan pequeñas variaciones con el movimiento de los taps de los trafos nunca exceden los límites de regulación.
- Los indicadores de sensibilidad expresados por medio de gráficos facilitan el análisis de los SEP y permiten que los resultados que los estudios arrojen sean presentados de forma clara y sencilla, de manera que cualquier persona ajena al tema comprenda dichos resultados.
- La interconexión y la cercanía geográfica entre los nodos de carga donde se inyectaron reactivos y los elementos del sistema, están directamente relacionados con la sensibilidad que estos elementos presentan a dicha inyección de reactivos.
- De los 20 nodos del SEP eléctrico de Pereira el que presenta mayor incremento porcentual en tensión es el nodo de **NA2**, con una variación positiva del 0,64% a causa de la inyección de reactivos en la misma barra.
- El nodo **ca** y **ROSA 2** nunca presentan variación de tensión ya que están directamente conectados a barras donde están ubicado los generador pv y *slack* respectivamente por lo tanto sus tensiones dependen de la tensión de operación de cada generador, El segundo lugar de los nodos más estables en tensión es para **pa1** que solo varía 0,17% positivamente en el caso de que la inyección de reactivos se haga en la misma barra.
- A excepción de los 3 nodos (**ca**, **ROSA**, **pa1**) ya mencionados se pueden considerar sensibles el resto de nodos ya que varían su tensión, como mínimo en 77,8% de los casos de inyección de reactivos en nodos de carga.

- Los nodos más sensibles del sistema son **BE, BE2, CEN, DQ, DQ3, pa, ROSA, VENTO2** ya varían positivamente su tensión en el 100% de los casos analizados.
- Aunque la mayoría de nodos de carga generan efectos en las tensiones de las demás barras del sistema hay cuatro nodos que pueden ser considerados como nodos pilotos (nodos que generan mayor impacto en un sistema) para el control de tensión en el SEP de Pereira ya que el delta de tensión es más grandes que las demás barras estos son **DQ3, CUBA3, VENTO2 y NA2**. Cada uno de estos nodos afecta el 85% del total de las barras del sistema el restante 15% pertenecen a las 3 barras menos sensibles ya mencionadas
- Los elementos del SEP de Pereira con mayor incremento porcentual de flujo de potencia reactiva son las líneas de **CENROS** (con un delta positivo del 44,73%) y **RO-VE** (con un incremento del 16,72%) a causa de la inyección de reactivos en los nodos de **CEN2 y VENTO2** respectivamente. Mientras que los elementos con más decrecimiento porcentual en su flujo de potencia reactiva son las líneas de **VE-NA**(con un delta negativo de -44,53%) y nuevamente la línea de **CENROS**(con decrecimiento del -11,88%) generado por la inyección de reactivos en la barras de **NA2 y CUBA** respectivamente
- la variación de flujo de potencia reactiva en las líneas es más dinámica y mayor que en los transformadores; quiere decir que las líneas tienen mayor grado de sensibilidad a las variaciones de reactivos en las cargas para este sistema.
- La línea de **CENROS** es el elemento más sensible del sistema ya que varía en el 100% de los casos analizados además como se mencionó anteriormente esta entre los elementos con mayor crecimiento y decrecimiento de flujo de potencia reactiva a causa de los reactivos inyectados a su misma barra y en los reactivos inyectados en el nodo de CUBA respectivamente. Para los transformadores los más sensibles son los conectados al nodo de la Rosa (**TRAFOROS1 y TRAFOROS2**) ya que varían en el 100% de los casos pero a diferencia de la línea **CENROS** no es el de mayor del de variación, los trafos **TRAFOPAVAS y TRAFODQ2 Y TRAFOD3** son los de mayor variación con un delta positivo del 15%.
- Para el caso del control de flujo de potencia reactiva, los nodos pilotos que más elementos del sistema afectan son **VENTO, VENTO2, CUBA3 y NA2** siendo los dos primeros trafos los que influyen en mayor cantidad de elementos del sistema.
- Los nodos de **VENTO2, CUBA3 y NA2** son los más importantes para este sistema ya que influyen tanto en las tensiones nodales como en el flujo de reactivos por los elementos del sistema

6. TRABAJOS FUTUROS

En trabajos futuros se puede analizar también como un incremento esta vez de la potencia activa influye sobre los parámetros del sistema.

Para este trabajo se analizó el incremento de reactivos en los nodos de carga uno a uno. Un trabajo futuro podría analizar este fenómeno con el incremento en varios nodos o incluso todos a la vez

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] **GARCÉS NEGRETE, LINA PAOLA. GÓMEZ CARMONA OSCAR 2005.** ANALISIS DE CONFIABILIDAD DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN REGIONAL USANDO SIMULACIÓN DE MONTECARLO . TRABAJO DE GRADO DE INGENIERIA ELECTRICA. PEREIRA: UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA. FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA, 2005.
- [2] **CARLOS J. ZAPATA. 2011.** CONFIABILIDAD DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA : TECNOLOGÍA ELÉCTRICA - UTP, 2011.
- [3] **POTENCIA-ACTIVA-REACTIVA.** [En línea] [Citado el: 29 de mayo de 2015]. <http://potenciaelectrica.wikispaces.com/4+Potencia+Activa+--+Reactiva+-+Aparente>
- [4] **FLUJO DE POTENCIA.** [En línea] [Citado el: 20 de mayo de 2013.] http://es.wikipedia.org/wiki/Flujo_de_potencia
- [5] **COSTA, ALFREDO. OLMEDO, CLAUDIA. 2002.** RESOLUCION DEL PROBLEMA DE FLUJO DE CARGAS. MONTEVIDEO : UNIVERSIDAD, 2005.
- [6] **ESCOBAR ZULUAGA, ANTONIO. 2012.** CURSO BASICO DE ANALISIS DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA . PEREIRA : TECNOLOGÍA ELÉCTRICA - UTP, 2011.

- [7] **METODO DE NEWTON.** [En línea] [Citado el: 3 de mayo de 2015.] http://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9todo_de_Newton
- [8] **DETERMINACION DE LIMITES DE TRANSMISION EN SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA.** [En línea] [Citado el: junio de 2014.] http://www.ingenieria.unam.mx/~revistafi/ejemplares/V15N2/V15N2_art10.pdf
- [9] **ALCON MESA, JOSE LUIS.** ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE CARGA SEGURA EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA . TRABAJO DE GRADO DE INGENIERIA TECNICA INDUSTRIAL. MADRID: UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID. FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA, 2010.
- [10] **LEON MARTINEZ, VICENTE.** COMPENSACION EN SISTEMAS DESBALANCEADOS UTILIZANDO ALGORITMOS GENETICOS : REVISTA CHILENA DE INGENIERIA , SANTIAGO (30 DE JULIO 2012) vol. 20 N° 3, 2012, pp. 284-292..
- [11] **GRUPO DE INVESTIGACION KAI. GRUPO DE INVESTIGACION EN ENERGIA GIEN, 2012.** CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA Y CONTROL DE LA DEMANDA : UNIVERSIDAD DEL ATLANTICO Y UNIVERSIDAD AUTONOMA DE OCCIDENTE, 2011.

8. ANEXOS

A continuación se podrán encontrar el restantes de gráficos de los 3 posibles casos de inyección de reactivos.

VARIACION PORCENTUAL DE CADA TENSION DE CADA NODO DEL SISTEMA CON RESPECTO AL AUMENTO DE REACTIVOS EN LOS NODOS DE CARGA.

Figura 31. Inyección de reactivos en el nodo: **pa1**

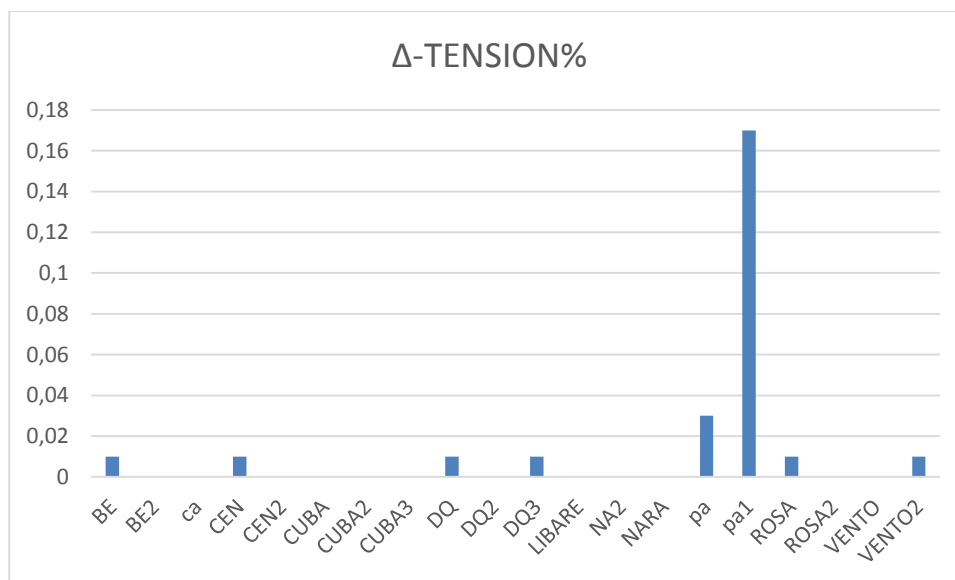


Figura 32. Inyección de reactivos en el nodo: **DQ3**

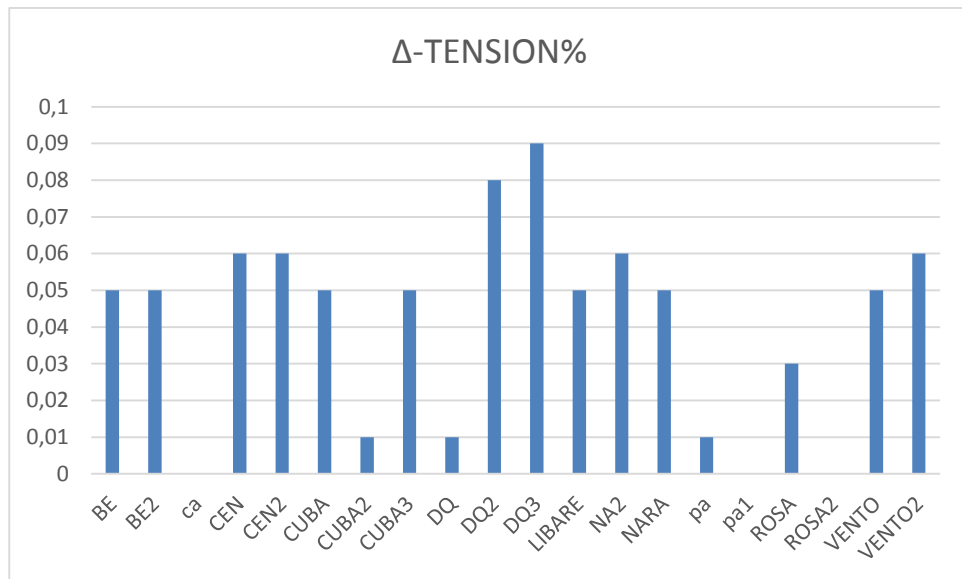


Figura 33. Inyección de reactivos en el nodo: **CEN2**

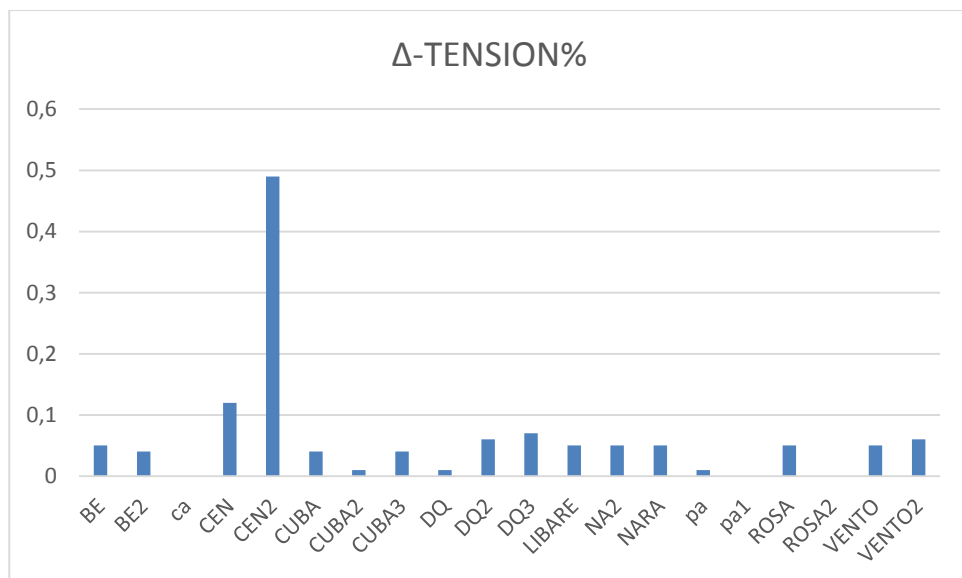


Figura 34. Inyección de reactivos en el nodo: **ROSA**

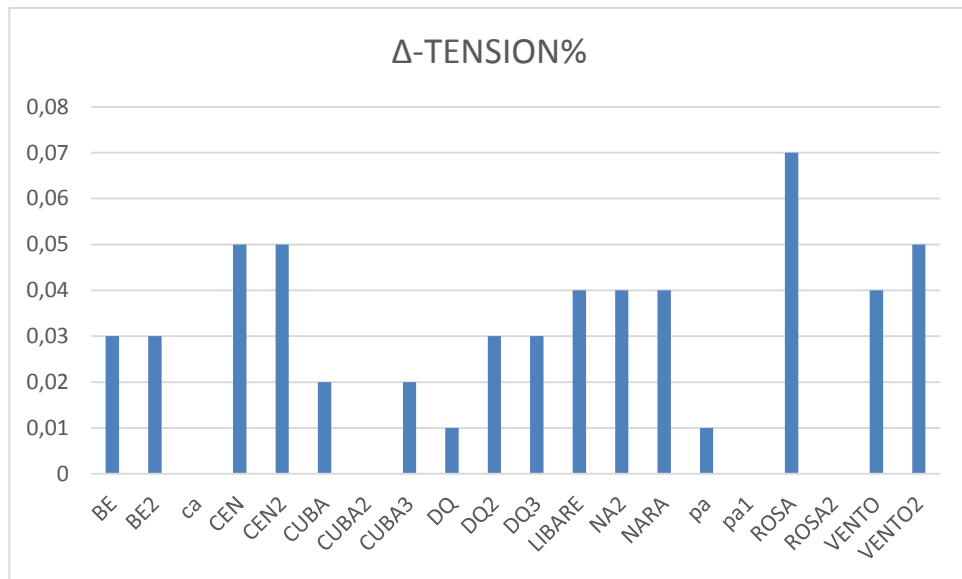
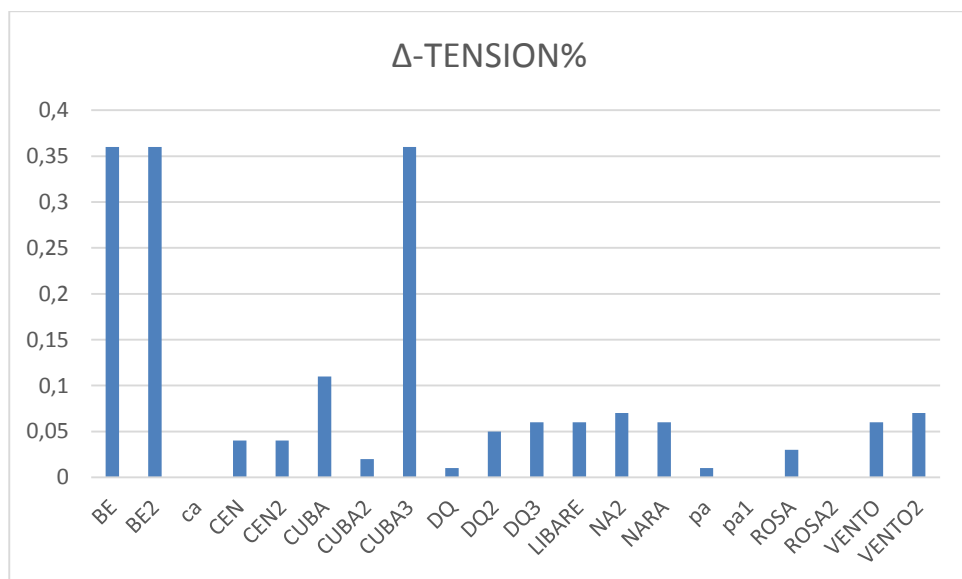


Figura 35. Inyección de reactivos en el nodo: CUBA3



VARIACION PORCENTUAL DE TENSION EN LOS NODOS DEL SISTEMA PARA INYECCIONN DE REACTIVOS EN UN NODO DE CARGA

Figura 36. Efecto de inyección de reactivos en el nodo: **VENTO**

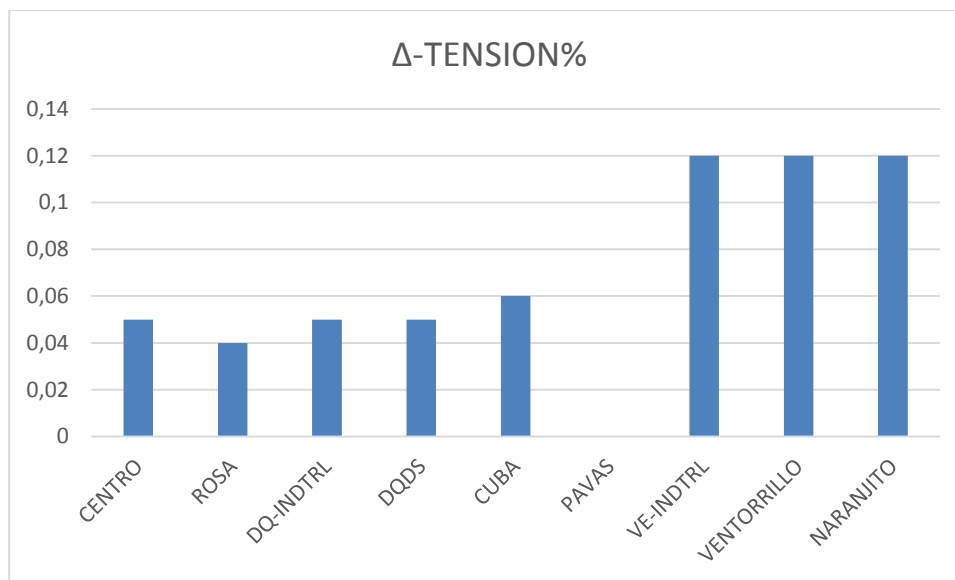


Figura 37. Efecto de inyección de reactivos en el nodo: **ROSA**

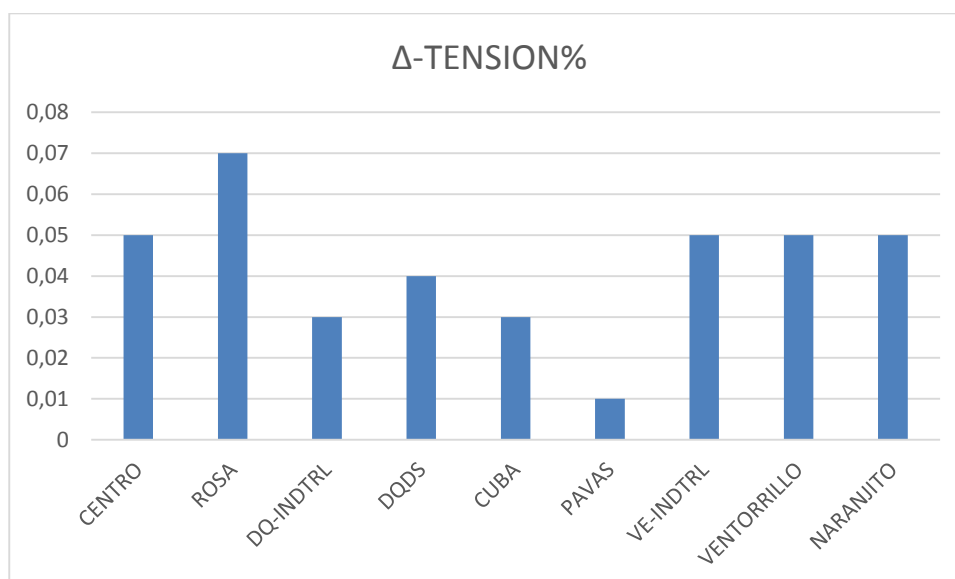


Figura 38. Efecto de inyección de reactivos en el nodo: **NARA**

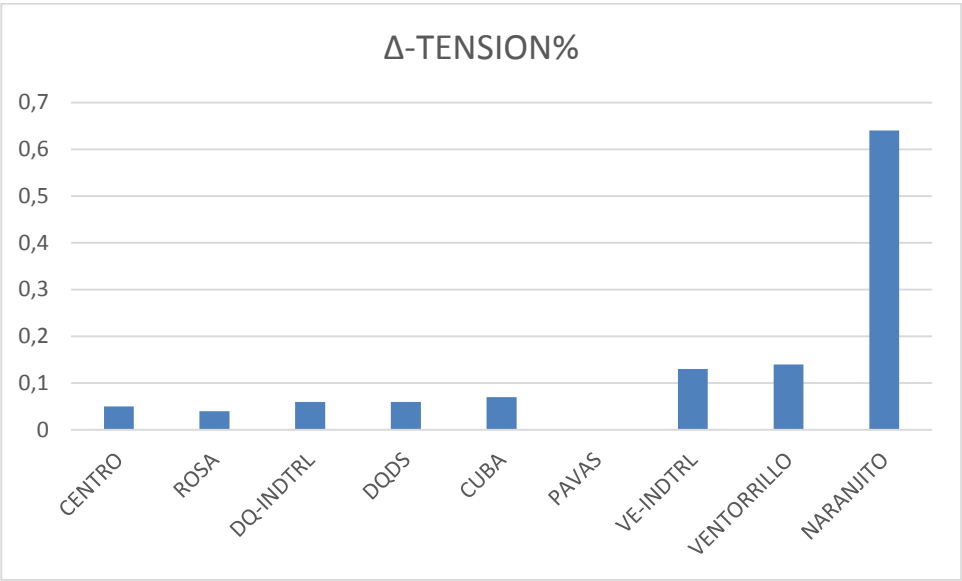


Figura 39. Efecto de inyección de reactivos en el nodo: **NA2**

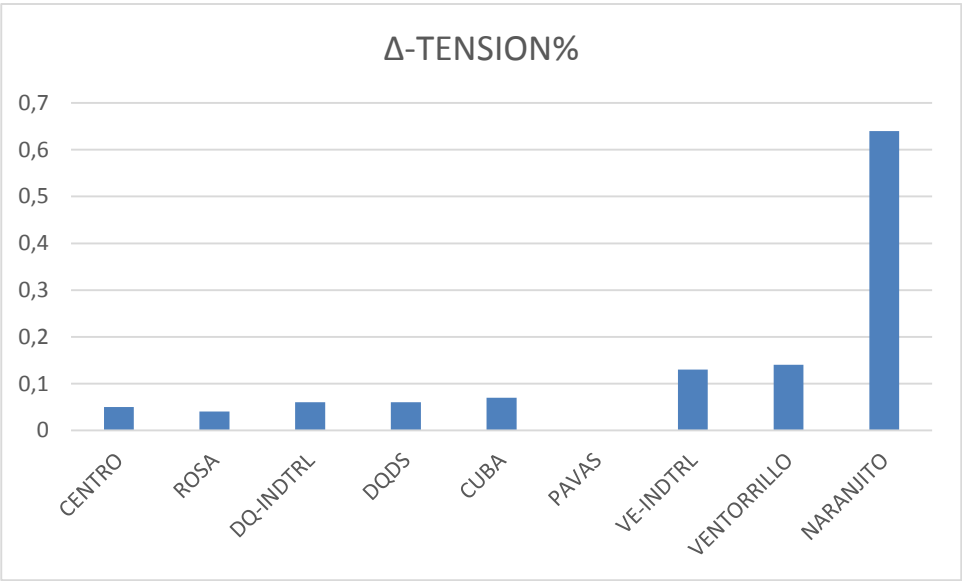


Figura 40. Efecto de inyección de reactivos en el nodo: **CUBA3**

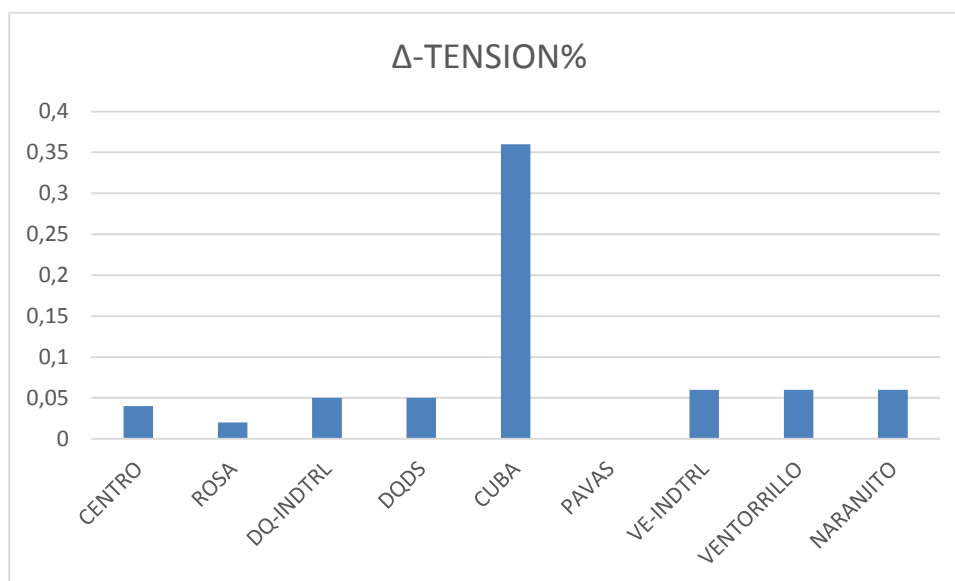


Figura 41. Efecto de inyección de reactivos en el nodo: **CUBA2**

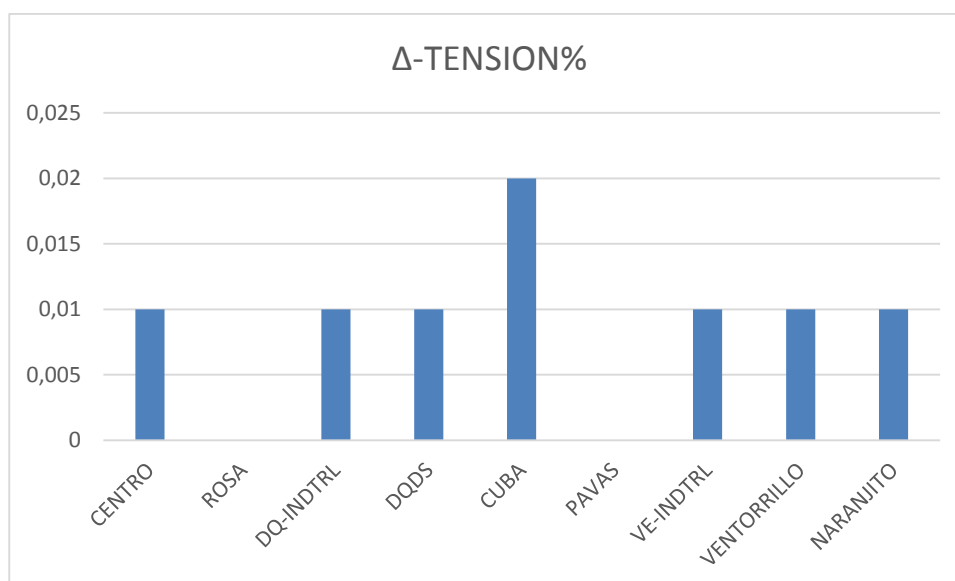


Figura 42. Efecto de inyección de reactivos en el nodo: **CUBA**

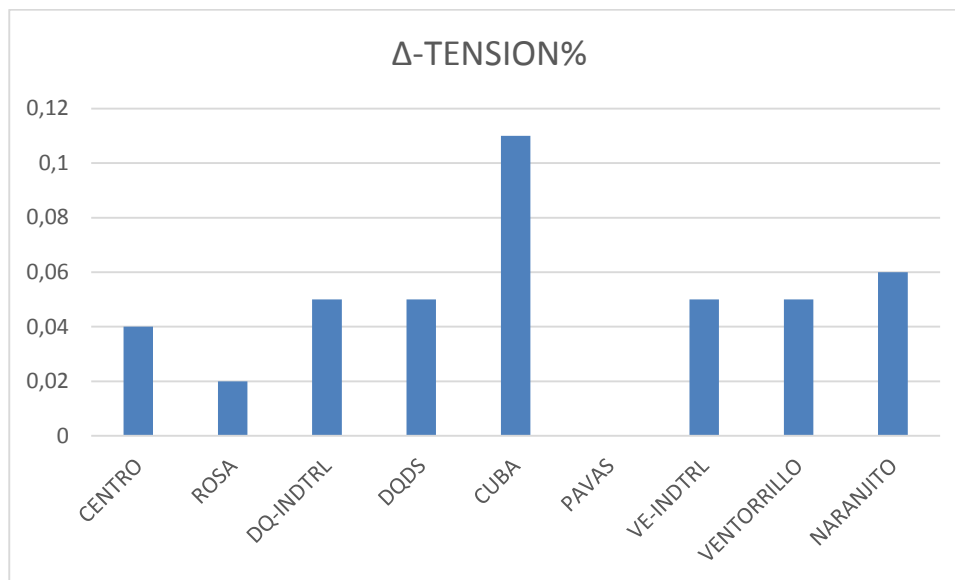


Figura 43. Efecto de inyección de reactivos en el nodo: **CEN**

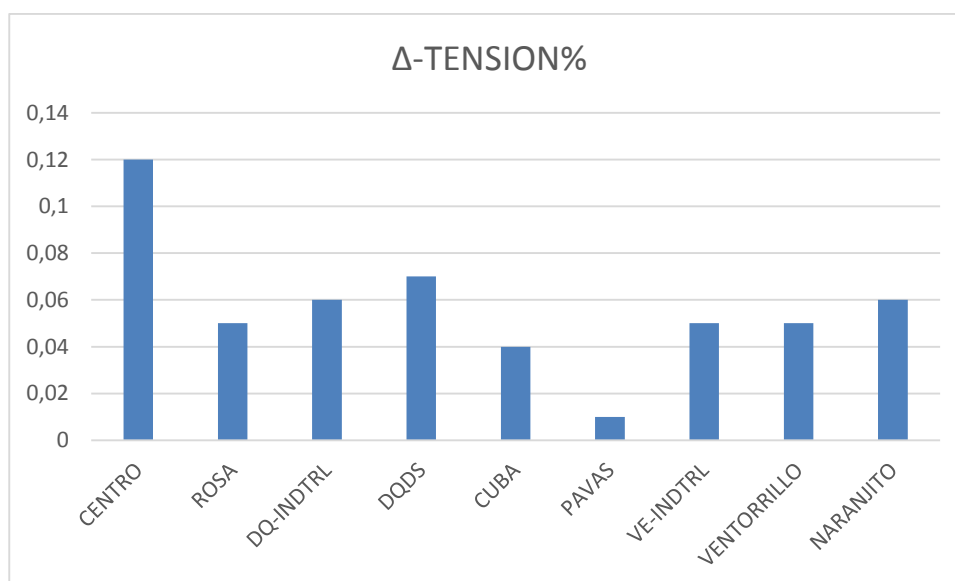


Figura 44. Efecto de inyección de reactivos en el nodo: **BE2**

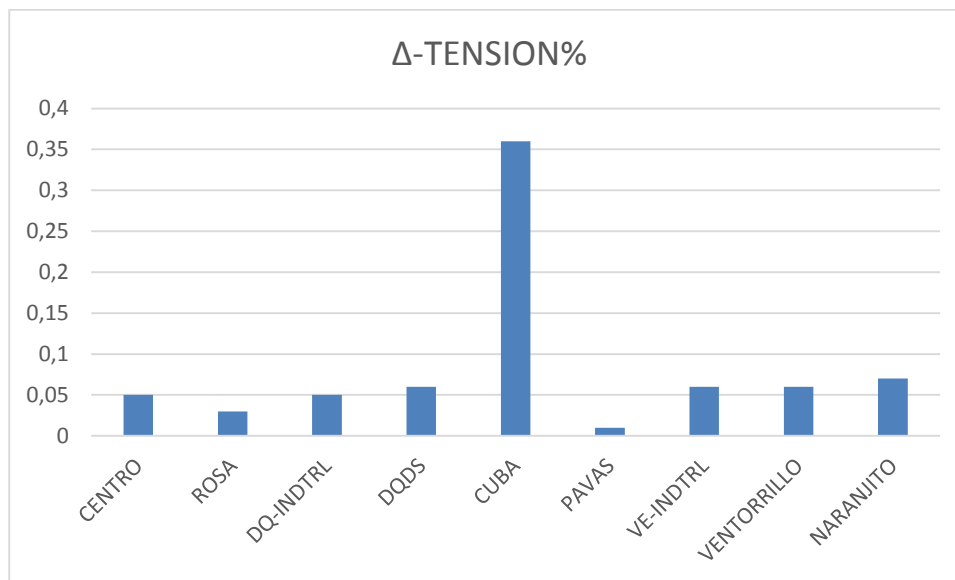
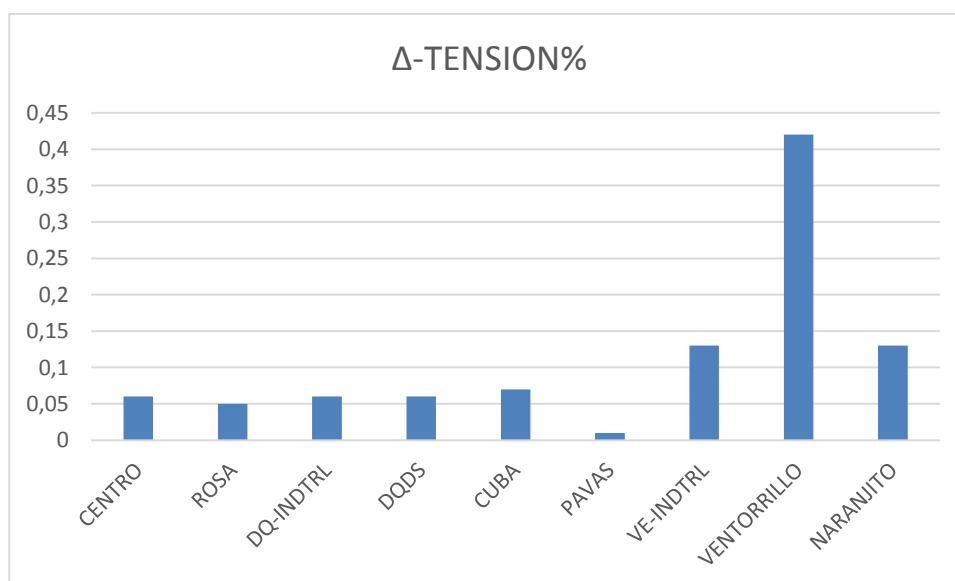


Figura 45. Efecto de inyección de reactivos en el nodo: **VENTO2**



VARIACION PORCENTUAL DEL FLUJO DE POTENCIA REACTIVA EN LOS ELEMENTOS DEL SISTEMA OCASIONADO POR LA INYECCION DE REACTIVOS EN LOS NODOS DE CARGA.

Figura 46. Variación del flujo de reactivos ocasionado por el nodo: **ROSA**

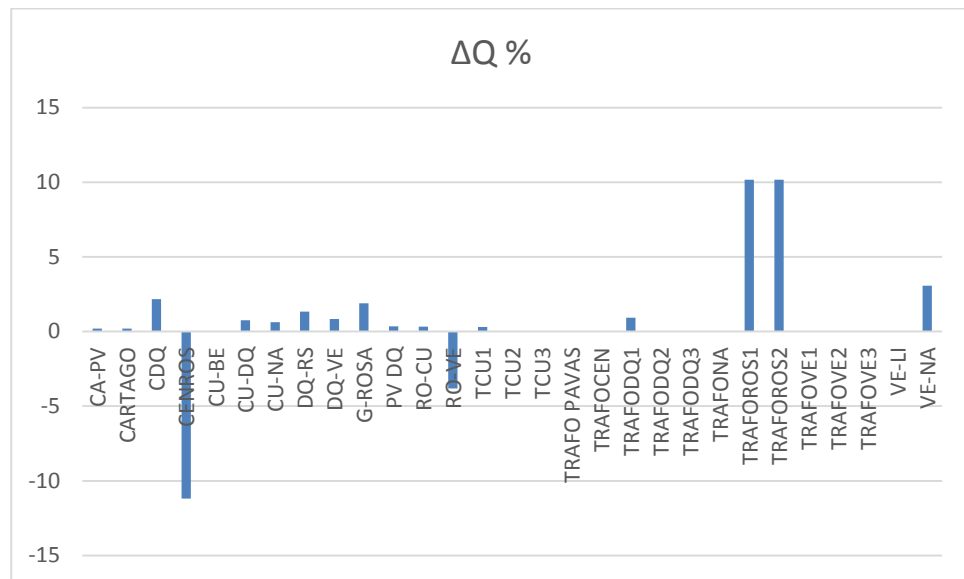


Figura 47. Variación del flujo de reactivos ocasionado por el nodo: **CEN2**

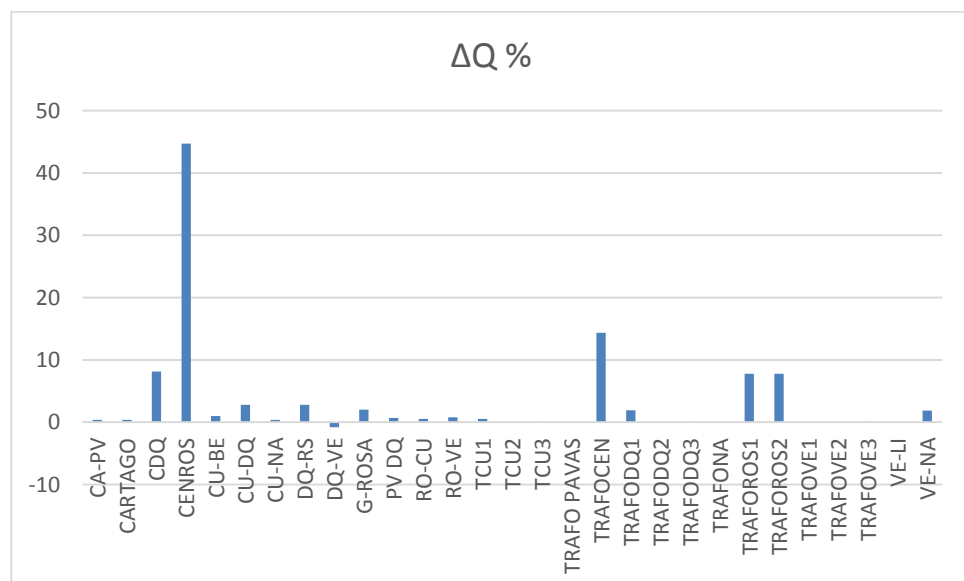


Figura 48. Variación del flujo de reactivos ocasionado por el nodo: **VENTO2**

